



***Facultad
de
Ciencias***

**Calibración de modelos termométricos
mediante la banda radiométrica de
Sentinel-3**

**(Calibration of thermometric models using the
Sentinel-3 thermometric band)**

**Trabajo de Fin de Grado
para acceder al**

GRADO EN FÍSICA

Autor: Óscar Manteca Martínez

Director: Alberto González Díez

Resumen

El objetivo de este trabajo es el de validar mediante la señal que registra el instrumento SLSTR incorporado en los satélites de la misión Sentinel-3, los modelos termométricos que se pueden elaborar en el área del centro zonal del Cantábrico en distintas fechas de 2019 correspondientes a las diferentes estaciones del año a partir de datos de estaciones pertenecientes a red automática de la AEMet. Para ello se lleva a cabo la elaboración de 3 modelos estadísticos de temperaturas en un Sistema de Información Geográfico y su posterior comparación con la señal de la banda LST (Land Surface Temperature) de Sentinel-3. Con el objeto de validar los resultados obtenidos se estudia la precisión de la señal registrada por Sentinel-3 comparada con estaciones externas adyacentes a Cantabria.

Palabras clave: Sentinel -3, AEMet, ArcGIS, SNAP, modelo estadístico.

Abstract

The objective of this project is to validate, through the signal recorded by the SLSTR instrument incorporated in the satellites of the Sentinel-3 mission, the thermometric models that can be elaborated in the Cantabrian zonal centre on different dates of 2019 corresponding to the different seasons along the year, based on data from stations belonging to the AEMet automatic network. To achieve this goal, the elaboration of 3 statistical models of temperatures is carried out in a Geographic Information System and its subsequent comparison with the signal of the LST (Land Surface Temperature) band of Sentinel-3. To validate the results obtained, the precision of the signal recorded by Sentinel-3 is studied in comparison with external stations adjacent to Cantabria.

Key words: Sentinel, AEMet, ArcGIS, SNAP, statistic model.

Índice

Resumen	1
Abstract	1
1. Introducción	4
1.1. Explicación de cómo se llega a la hipótesis	4
1.2. Explicación de la hipótesis	4
1.3. Definición de objetivos	5
2. Metodología	6
2.1. Flujo de trabajo	6
2.1.1. Programa Copérnico	7
2.1.2. Sentinel-3	9
2.1.3. SLSTR	11
2.1.4. Selección de datos de Sentinel-3	11
2.1.5. Descarga de datos de Sentinel-3	12
2.1.6. Descarga de datos de AEMet	14
2.1.7. Herramientas de trabajo: SNAP y ArcGIS	15
2.1.7.1. Procedimiento en SNAP	15
2.1.7.2. Procedimiento en ArcGIS	15
2.1.7.2.1. Modelo del inverso de la distancia ponderada (IDW)	16
2.1.7.2.2. Modelo Spline	17
2.1.7.2.3. Modelo adiabático seco	18
2.1.7.2.4. Criterios de validación	18
3. Resultados	19
3.1. Resultados de las medidas de las estaciones y la señal de Sentinel-3	19
3.2. Resultados de cada modelo de interpolación	22

3.3. Comparación de modelos con Sentinel-3	25
4. Conclusiones	29
5. Referencias bibliográficas	30
Anexo	31

1. Introducción

1.1. Explicación de cómo se llega a la hipótesis

Los modelos termométricos reflejan la variabilidad de la temperatura a lo largo de un territorio, (Ref[1], Ref[2], Ref[3] y Ref[4]). Para reflejar dicha variabilidad, los modelos parten de datos de estaciones termométricas distribuidas en una zona o territorio, que ofrecen lectura de la temperatura del aire sobre el terreno, y que suelen pertenecer a redes de estaciones meteorológicas calibradas (como (Ref [5]), u otras estaciones de redes meteorológicas europeas, Meteoclimatic etc. Ref[6] Ref[7]). Desde dichas estaciones se extiende el valor de la temperatura a todo el territorio empleando procedimientos geoestadísticos de interpolación.

No obstante y a pesar de la aplicación de métodos de interpolación con una sólida base matemática, el valor finalmente obtenido contiene una cierta incertidumbre que es debida a diferentes razones. Por un lado, la influencia de variables geográficas en la lectura de la temperatura (situaciones de latitudes tropicales en contra de otras más ecuatoriales o boreales, etc.) que introducen sesgos importantes en los modelos (Ref[8] y Ref[9]). La forma de la red de medida, su resolución espacial, precisión de los datos, etc., que ejerce un papel importante en la construcción del de los modelos (Ref[10]) . Y por último de la dificultad de encontrar datos para validar los modelos en zonas remotas de difícil acceso (Ref[11] Y Ref[12]). Es precisamente en este tipo de entornos en los que los datos procedentes de sensores instalados en plataformas aéreas o satelitales aportan un notable impulso a la validación. Desde estas plataformas es posible determinar la temperatura de una amplia zona del territorio empleando las lecturas aportadas por radiómetros como los incorporados en el instrumental las misiones Meteosat y Sentinel. En concreto, en la plataforma Sentinel-3, va instalado el instrumento SLSTR (Sea and Land Temperature Radiometer) que permite medir la temperatura del océano y superficie terrestre (Ref[13], Ref[14] y Ref[15]).

1.2. Explicación de la hipótesis

Uno de los problemas que tienen los modelos construidos de la manera descrita anteriormente, es la validación de los resultados obtenidos.

En este último sentido, la medida de la temperatura con radiómetros externos transportados en plataformas satelitales o aéreas (como Sentinel-3), permite medir

valores de temperatura en cualquier parte de territorio incluidas las zonas de difícil acceso.

La hipótesis contenida en el presente trabajo es que es posible validar dichos modelos termométricos (los construidos a partir de datos termométricos obtenidos de redes meteorológicas terrestres) mediante la señal radiométrica del instrumento SLSTR incorporado a Sentinel-3.

1.3. Definición de objetivos

Una vez definida la hipótesis sobre la que trabajar, es necesario definir los objetivos que se pretenden alcanzar a la hora de realizar este trabajo. Así se pueden definir dos tipos de objetivos: generales y específicos.

El objetivo general es fácil de definir y coincide con la hipótesis: validar la temperatura de modelos termométricos mediante la señal del radiómetro instalado en Sentinel 3 en fechas concretas correspondientes a las 4 estaciones del año.

Este objetivo general se desarrolla a través de los siguientes objetivos específicos, que corresponden con las diferentes fases del desarrollo de este proyecto. Dichos objetivos son, a su vez, las metas específicas que se pretende alcanzar durante la realización de este proyecto.

Descargar y extraer la señal radiométrica de las imágenes de Sentinel-3 para las fechas seleccionadas en la investigación, con el fin de construir modelos radiométricos que permitan la calibración ulterior de otros modelos termométricos.

Generar un banco de datos de temperatura a partir de los registros termométricos procedentes de estaciones automáticas pertenecientes a la red de AEMET, o de otras redes de estaciones automáticas equivalentes, para la zona de estudio y para las fechas seleccionadas en el mismo.

Construir una geodatabase de la zona de estudio que incorpore datos topográficos y geográficos, así como los registros de las estaciones meteorológicas seleccionadas y que permitan el análisis espacial de la información.

Construir modelos termométricos para una región a partir de la base de datos de temperaturas anteriormente comentada, empleando interpoladores popularmente utilizados.

- IDW (Inverse of the Distance Weighted).

- Spline.

- Adiabático seco.

Validar los modelos termométricos obtenidos

Analizar las diferencias existentes entre los modelos termométricos obtenidos por interpolación y los desarrollados mediante la señal radiométrica de sentinel 3.

2. Metodología

La idea del presente proyecto es emplear los datos procedentes de estaciones meteorológicas automáticas de la red de AEMet existentes en el norte de España en una región circundante a Cantabria para crear los modelos termométricos mencionados y compararlos con los resultados de temperatura aportados por señal de Sentinel-3.

Se ha elegido un área en el entorno al Centro Zonal del Cantábrico (Santander), puesto que existe una red de estaciones meteorológicas bien conocidas y la posibilidad de tener acceso directo a las mismas.

2.1. Flujo de trabajo

Se describen a continuación la forma en que se ha trabajado y los procedimientos que se han seguido a la hora de llevar a cabo la selección de los datos a descargar y su posterior procesamiento en programas de análisis de imagen. El tener una estructura de trabajo definida puede contribuir a minimizar errores y optimizar el tiempo ejecución de los resultados.

Una vez definida el área de estudio de estudio (que en adelante se denominará área de interés) en el que se ha trabajado (zona del cantábrico circundante al entorno del Centro Zonal del Cantábrico de la AEMet), que comprende todo el territorio de Cantabria y zonas adyacentes de Asturias, León, Burgos y País Vasco, se definieron las fechas en las que se registraron las medidas (tanto sobre el terreno como de los satélites). En este proyecto se ha trabajado con fechas correspondientes a lecturas desarrolladas a lo largo de una semana, perteneciente a cada una de las estaciones del año; siendo el año elegido el 2019). Los registros termométricos elegidos deben tener correspondencia con los satélites, para el área de interés y para las mismas fechas. Aunque el registro de la señal aportada por Sentinel-3 es muy abundante y continua, no todas las fechas del año poseen registros útiles de Sentinel-3 de la zona. De manera que el registro de estaciones se ha visto condicionado por la disponibilidad de las imágenes con las que realizar las respectivas comprobaciones. La condición de contorno para elegir las fechas del estudio es que haya una coincidencia entre la disponibilidad de registros termométricos y la señal de Sentinel-3, lo que limita las posibles comparaciones de resultados. Una vez realizada la descarga de imágenes, éstas se han procesado siguiendo un tratamiento básico de teledetección. Para ello, se ha usado un programa gratuito de la Agencia Espacial Europea (European Space Agency (ESA)) denominado SNAP (Science Toolbox

Exploitation Platform). Una vez procesadas las imágenes y extraída la señal de interés, correspondiente al SLSTR, se han incorporado a un SIG (ArcGIS 10.4.1). Asimismo, los datos de las estaciones meteorológicas seleccionadas, descargados desde la web de la AEMet (<https://datosclima.es/Aemet2013/Temperatura2013.php>) han sido incorporados a una hoja Excel. Dichos registros también se han incorporado al SIG para su ulterior tratamiento. Dentro del entorno de trabajo que aporta el SIG se han llevado a cabo los modelos termométricos de la región empleando dos de los interpoladores más conocidos (inverso de la distancia ponderado, en inglés IDW; y “Spline”). Asimismo, se ha empleado un modelo adicional basado en un ajuste adiabático seco clásico, que considera la información altimétrica del pixel en cálculo. Por último, Los modelos así obtenidos son comparados con los registros extraídos de Sentinel-3 , también dentro del SIG.

2.1.1. Programa Copérnico

El Programa Copérnico nace de la necesidad de monitorizar el estado del planeta para poder revertir la situación de cambio climático, que se está constatando actualmente. Así se pueden diseñar estrategias para intentar reducir el consumo abusivo de recursos y paliar la acción de riesgo naturales. En definitiva, proteger al medio ambiente de los impactos que se puedan ocasionar como consecuencia de las actividades humanas. Para cumplir sus objetivos, el programa debe llevar a cabo la observación del medio ambiente, recoger, procesar y analizar datos del planeta. Y así mismo, proveer productos que permitan, a los organismos de toma de decisión, tener la capacidad de actuar con anticipación y de forma más efectiva y eficiente.

El programa Copérnico consta de 6 familias de satélites Sentinel, que pueden trabajar de manera independiente o coordinada con centros de estudio en superficie. Este programa tiene una base de datos abierta en la que los satélites introducen los resultados de las observaciones para que pueda ser almacenada y posteriormente empleada tanto por científicos como por políticos, y cualquier otro usuario. Los datos aportados por las misiones Sentinel sirven para generar mapas temáticos ambientales (topográficos, climáticos, de contaminación, de cubierta vegetal, etc.) que permiten conocer el estado del planeta en el pasado y el presente así como hacer predicciones de las tendencias que seguirán los ecosistemas a futuro.

Los servicios que ofrece este programa se engloban en 6 grandes paquetes: monitorización de la atmósfera, monitorización del entorno marino, monitorización terrestre, cambio climático, gestión de emergencias y seguridad. Estos se traducen en áreas de aplicación concretas y efectivas.

En lo que respecta al medio ambiente, el Programa Copérnico (Programa Copérnico, 2021) detecta las partículas de aerosoles que destruyen la capa de ozono

analizando la composición de la atmósfera y su biodiversidad, mide regularmente el ritmo al que se derrite la capa de hielo en el Ártico como resultado del incremento de temperaturas debido al calentamiento global, determina la calidad del aire y agua para la salud de las personas y analiza la topografía de los fondos marinos y la zona terrestre para predecir posibles consecuencias o daños colaterales producidos por inundaciones, terremotos o incendios. En el sector energético, fomenta el uso de energías renovables con el fin de reducir el consumo de combustibles fósiles. En la vigilancia de las fronteras el programa tiene como objetivo prevenir riesgos potenciales. Al igual que en la monitorización de la atmósfera, el Programa Copérnico se encarga de vigilar la contaminación de los océanos que afecta a los ecosistemas acuáticos así como la actividad pesquera. Con el fin de evitar la pérdida de biodiversidad y reserva de alimentos para distintas especies, el Programa Copérnico es capaz de detectar indicios de deforestación o desertificación, así como de monitorizar cultivos. Además de todos estos ejemplos, este programa puede ser de utilidad en la planificación urbana, arqueología o búsqueda de recursos mineros o energéticos, constituyendo así una herramienta multifuncional, eficiente, en constante evolución y abierta a todos los usuarios.

El Programa Copérnico incluye seis misiones Sentinel: Sentinel-1 (mapeo por radar la superficie de la Tierra (periodo de órbita de 98.74 minutos)), Sentinel-2 (monitorización de vegetación suelos y zonas costeras (periodo de órbita de 100.69 minutos)), Sentinel-3 (observación de las superficies marinas y terrestres evaluando temperatura color y cobertura (periodo de órbita de 100.99 minutos)), Sentinel-4 (monitorización de la atmósfera en alta resolución para hacer predicciones climáticas en Europa (en desarrollo)), Sentinel-5 (composición de la atmósfera y monitorización global de la calidad del aire (periodo de órbita 100.99 minutos)) y Sentinel-5P (medidas atmosféricas de alta calidad centradas en la capa de ozono y la radiación UV). Ref[16]

Los datos de cada misión se pueden descargar en el Sentinel Hub o a través de la web <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/sentinel-data-access>.

El centro de tierra del Programa Copérnico se encarga de monitorizar las misiones, recabar, procesar, archivar y distribuir a los usuarios las medidas de cada una de ellas. Además del centro de Copernicus, colaboran en estas tareas los centros de la ESA, EUMESAT, misiones nacionales y demás organizaciones.

Los principales instrumentos de los que hacen uso estas misiones y que van incorporados en los satélites son: Synthetic Aperture Radar (SAR), MultiSpectral Instrument (MSI), Ocean and Land Colour Instrument (OLCI), Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) y TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI). Además de estos instrumentos (que son los más genéricos), cada misión dispone de instrumentos propios que permiten adecuar las medidas de cada uno al fin que persigue la misión en la que participan.

2.1.2. Sentinel-3

Sentinel-3 es una constelación de satélites de observación terrestre desarrollada por la ESA como parte del Programa Copérnico antes mencionado (Ref[17] y Ref[18]). En la actualidad, la constelación está formada por 2 satélites (Sentinel-3A (S3A), Sentinel-3B (S3B)). Cada uno de ellos posee un diseño como el que se presenta en la Figura 1 (una descripción más detallada se puede encontrar en <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3>).

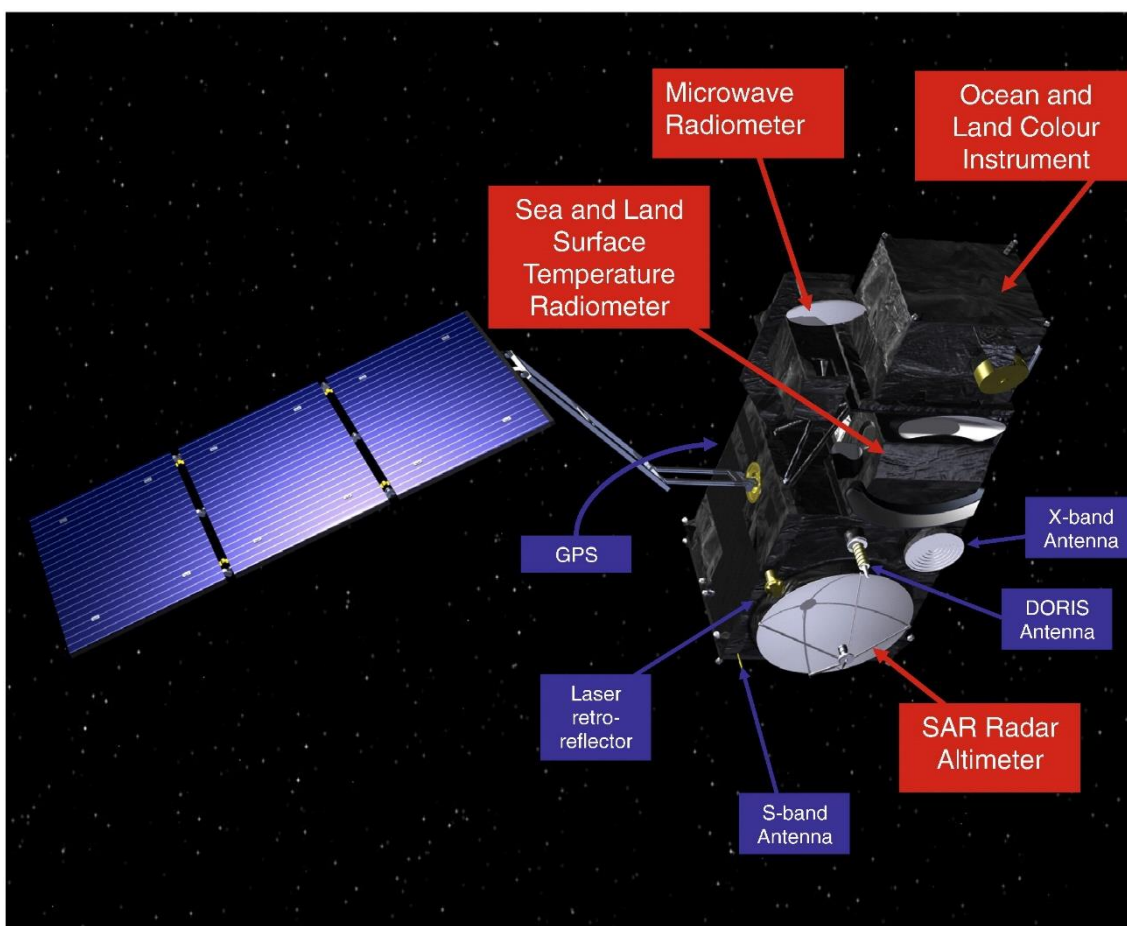


Figura 1. Muestra el diseño de uno de los satélites sentinel-3 junto con los instrumentos que incorpora (imagen de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3/instrument-payload>).

Esta constelación sigue una órbita polar, con una altitud de 814,5 km. El periodo de la órbita es de 100.99 minutos, los ciclos de captura de información son cada 27 días (14+7/27 órbitas por día, 385 órbitas por ciclo). Dichas características hacen que la separación entre los satélites sea de 140°. Posee una órbita heliosincrónica, que en

trayectoria descendiente cruza el tiempo solar medio a las 10:00, lo que hace que la superficie esté siempre iluminada con el mismo ángulo. La inclinación de la órbita (distancia orbital entre el plano orbital y el ecuador) es de 98.65° , lo que le permite obtener una visión óptima de del hielo y nieve en latitudes altas. El ciclo orbital, y las características de la órbita, facilitan que el satélite pase sobre el mismo punto geográfico de la Tierra a la misma hora.

Estas plataformas se han lanzado entre febrero de 2016 (Sentinel-3A) y abril de 2018 (Sentinel-3B). Hay proyecto de lanzar un Sentinel-3C en el presente año.

Cada una de las plataformas incorpora los siguientes instrumentos: Radiómetro de Microondas (MWR); Instrumento de Color de Océano y Tierra (OLCI); Altímetro Radar de Apertura Sintética (SRAL); Orbitografía Doppler y Radioposicionamiento Integrado por Satélite (DORIS); Radiómetro de Temperatura de la Superficie del Mar y la Tierra (SLSTR). Precisamente este último instrumento es con el que se trabaja en el presente proyecto.

Los objetivos que pretende Sentinel-3 con dichos instrumentos son: medir la topografía de la superficie del mar, la altura de la superficie del mar y la altura significativa de las olas, medir la temperatura del océano y de la superficie terrestre, medir el color del océano y de la superficie terrestre, monitorear la topografía del hielo marino y terrestre, monitoreo de la calidad del agua del mar y la contaminación, monitoreo de aguas continentales, incluidos ríos y lagos, ayudar a pronosticar el clima marino con los datos adquiridos, monitoreo y modelado del clima, monitoreo de cambio de uso del suelo, mapeo de la cubierta forestal, detección de incendios, predicción del tiempo y medir la radiación térmica de la Tierra para aplicaciones atmosféricas. A pesar de que el lanzamiento del primer Sentinel-3 es relativamente próximo (2016), muchos de los productos Sentinel 3, son operativos desde 2018 (ver Ref[19])

Para este trabajo se van a emplear imágenes de los satélites Sentinel-3A (S3A) y Sentinel-3B (S3B).

Los satélites Sentinel-3 disponen de 21 bandas de información en las que registran diferentes medidas como pueden ser información de la cobertura del suelo, las temperaturas de la superficie terrestre y marina, o el porcentaje de superficie de cultivo destinada a prado, a regadío a secano...

Para poder describir con tanto detalle la superficie de la Tierra, es necesario que los datos se presenten tras ser tratados. Dependiendo de la profundidad del procesamiento, se distinguen 3 niveles de procesamiento: Nivel-0, que hace referencia a los datos brutos que puede medir cualquier instrumento; Nivel-1, son datos que han sido tratados automáticamente para poseer referencias geográficas y temporales pero no permiten elaboración de modelos; y Nivel-2, que son los datos que se han procesad

a partir del Nivel-1 y están suficientemente detallados como para elaborar mapas y modelos de toda índole. Precisamente para este trabajo se emplean datos de Nivel-2.

2.1.3. SLSTR

El SLSTR es el instrumento con el que se trabaja a la hora de obtener la señal radiométrica de Sentinel-3, y su objetivo principal es proporcionar un conjunto de datos de referencia de temperatura de la superficie terrestre y marina para elaborar registros de datos climáticos. Este instrumento se ha desarrollado para recuperar temperaturas de la superficie del mar de cobertura global con una incertidumbre de ± 0.3 K para un área de 1 km^2 Ref[20]. Para registrar la señal recibida, este instrumento cuenta con dos cuerpos negros de alta precisión (uno centrado en 260K y otro en 302K para abarcar el rango de temperaturas más habitual). Los canales que reciben las longitudes de onda se dividen para mejorar la imagen de la siguiente manera: $0.555\mu\text{m}$ (S1), $0.660\mu\text{m}$ (S2), $0.870\mu\text{m}$ (S3), $1.6\mu\text{m}$ (S5), $3.74\mu\text{m}$ (S7), $10.8\mu\text{m}$ (S8), y $12\mu\text{m}$ (S9) dando como resultado una muestra continua. Los canales no mencionados ($1.375\mu\text{m}$ (S4) y $2.25\mu\text{m}$ (S6)) son canales que se crearon posteriormente a los anteriores con el fin de mejorar la detección de nubes.

En la Figura 2 se muestra un esquema del SLSTR incorporado en Sentinel-3:

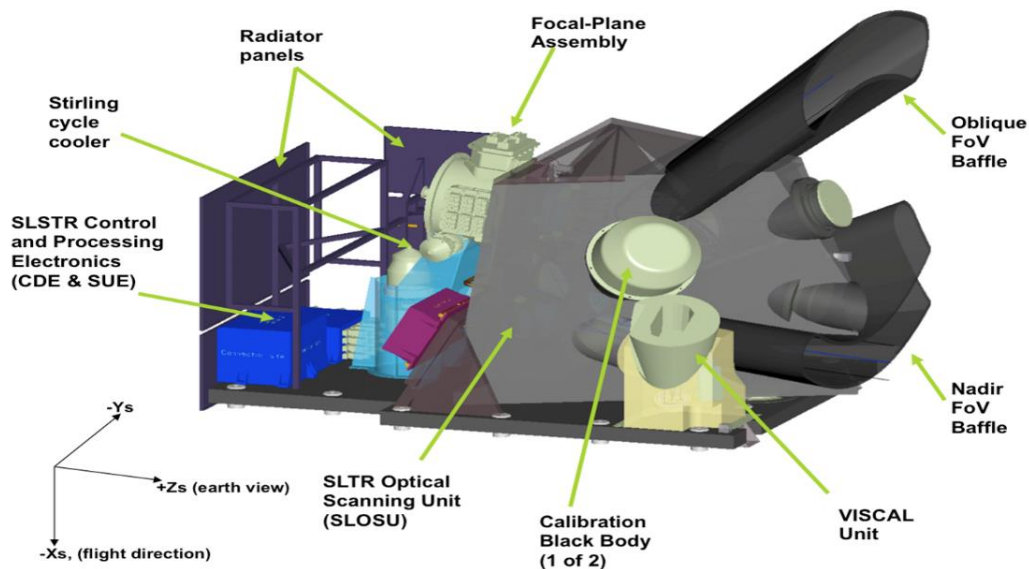


Figura 2. Muestra el esquema del instrumento SLSTR con todos sus componentes.

2.1.4. Selección de datos de Sentinel-3

A la hora de seleccionar las imágenes de Sentinel-3 con las que trabajar se consideraron los aspectos que se comentan a continuación.

En primer lugar, se tuvo en cuenta el área geográfica de estudio. Este paso no es trivial, pues las órbitas descritas por los satélites no son iguales cada día (con el fin de abarcar la totalidad de la superficie terrestre). Por lo tanto, es posible que alguna de las imágenes disponibles no contenga la totalidad del área que se pretende estudiar (a partir de ahora a esta superficie se la denominará como área de interés).

En segundo lugar, se seleccionaron las fechas en las que se trabajó. En el caso que abarca el presente proyecto se seleccionaron las imágenes de una semana típica, correspondiente a cada una de las cuatro estaciones del año de 2019. En la medida de lo posible se intentó que cada una de las semanas seleccionadas estuviera completada por el mayor número de imágenes disponible.

En tercer lugar, se escogieron sólo aquellas que tuvieron la misma franja horaria. Los satélites S3A y S3B toman imágenes de la península Ibérica en dos franjas horarias distintas: una diurna (entre las 10:00 y las 12:00 UTC) y una nocturna (entre las 20:00 y las 22:00). Para llevar a cabo comparaciones de temperaturas entre distintas fechas, es necesario que las imágenes correspondan a la misma franja horaria. De no ser así, las temperaturas podrían presentar algunas diferencias significativas debidas a la diferente hora del día en el que se realizaron las lecturas.

En cuarto y último lugar, se descartaron aquellas imágenes que incluyen nubes en el área de interés, y que lógicamente ofrecen la temperatura de la superficie de la nube. Se debe tener presente que, si bien las estaciones meteorológicas convencionales pueden tomar medidas de temperatura independientemente de las condiciones meteorológicas, no ocurre lo mismo con las imágenes de satélite.

2.1.5. Descarga de datos de Sentinel-3

El proceso de descarga de imágenes de Sentinel-3 se puede llevar a cabo entrando en los servicios que ofrece Copernicus a través de su centro de información y descarga (Sentinel Hub, Ref[21]). Lógicamente, el proceso de búsqueda de información requiere de una autorización motivada, otorgándose al usuario las credenciales y permisos de descarga correspondientes. Este servicio incluye un SIG online en el que se puede seleccionar el área geográfica de la que se precisa la información, la misión Sentinel para trabajar (Sentinel 1, 2, 3, etc), el tipo de plataforma (Sentinel 3A o 3B), el nivel de procesamiento de la imagen, y su fecha. El sistema representa la traza de la órbita para los parámetros seleccionados. A continuación, y en base a dicha información es posible solicitar al sistema la descarga de las imágenes que mejor se adaptan a los requerimientos manifestados por el usuario (Figura 3)

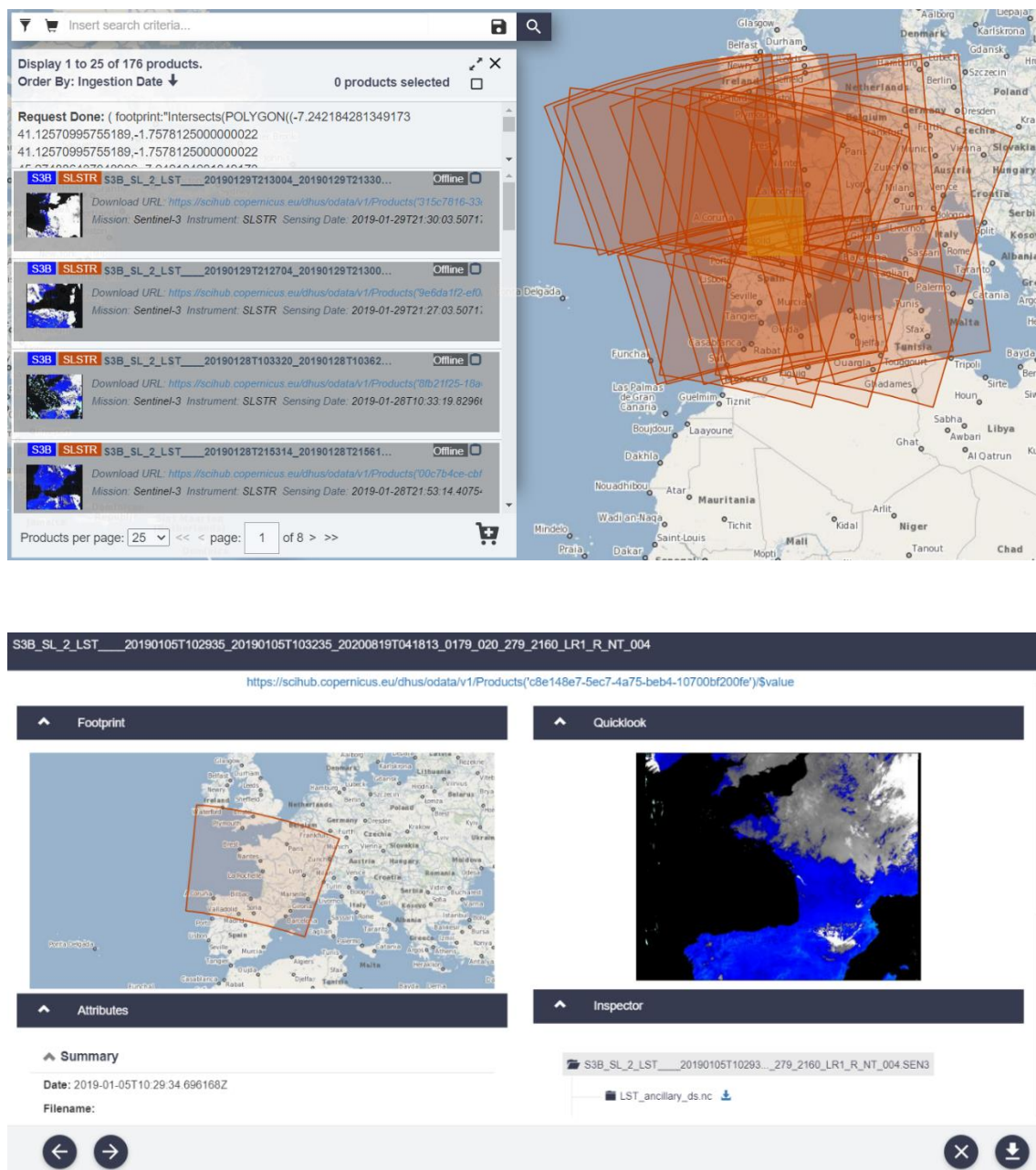


Figura 3. Detalle de Sentinel Hub, en el que se muestra: superior, el recubrimiento sobre el terreno de las órbitas Sentinel-3 seleccionadas para alguna de las efemérides elegidas en este trabajo; inferior, detalle de una imagen con su recubrimiento geográfico (izquierda) y la visión simplificada que observa el satélite (derecha) en la que es posible identificar el manto nuboso.

Los datos de la imagen solicitada están georreferenciados y comprimidos en formato zip. No obstante, por razones de almacenamiento de la información, muchas de las selecciones solicitadas son aportadas por Sentinel Hub dentro de las 48 horas de su solicitud. Esta circunstancia implica un proceso de descarga complicado.

2.1.6. Descarga de datos de AEMet

Teniendo en cuenta el área de interés, las estaciones automáticas terrestres de la AEMet se han dividido en dos grupos. El grupo proceso, corresponde al conjunto de estaciones con las que se construyeron los modelos termométricos. El área geográfica al que corresponde dicho grupo se sitúa en Cantabria. El grupo control, corresponde al conjunto de estaciones con las que se han validado los resultados. Dicho grupo se sitúa geográficamente en zonas externas a Cantabria, pero adyacentes, de manera que dicho grupo de estaciones se localiza alrededor del grupo proceso.

El grupo proceso está formado por las estaciones de: Alto Campoo, Bárcena de Cicero, Fuente De, Castro Urdiales, Cillórig de Liébana, Bárcena Mayor, Ramales de la Victoria, Reinosa, San Felices de Buelna, San Vicente de la Barquera, Santander, Santander Aeropuerto, Santillana del Mar, Soba, Torrelavega, Tresviso, Cubillo del Ebro, Polientes y Villacarriedo.

El grupo control está formado por las estaciones de: Llanes, Carreña de Cabrales, Amieva de Panizales, Colunga, Riaño, Camporredondo de Alba, Aguilar de Campoo, Sargentos de la Lora, Balmaseda, Sopuerta, Medina de Pomar, Güeñes, Cervera de Pisuerga, Posada de Valdeón y Punta Galea.

Los datos de estas estaciones de la AEMet están disponibles en su página web. Su base de datos contiene los siguientes campos de información: coordenadas de latitud y longitud, Provincia a la que pertenecen, altitud en la que se sitúa la estación y un número indicativo que identifica la estación en particular.

Existen otras páginas web desde la que poder acceder también a dicha información. Un ejemplo es datosclima.es (Ref[22]). Este soporte además de facilitar la información contenida en la base de datos de AEMet, ofrece productos gráficos para visualizar la información a lo largo de un periodo de tiempo (Figura 4).

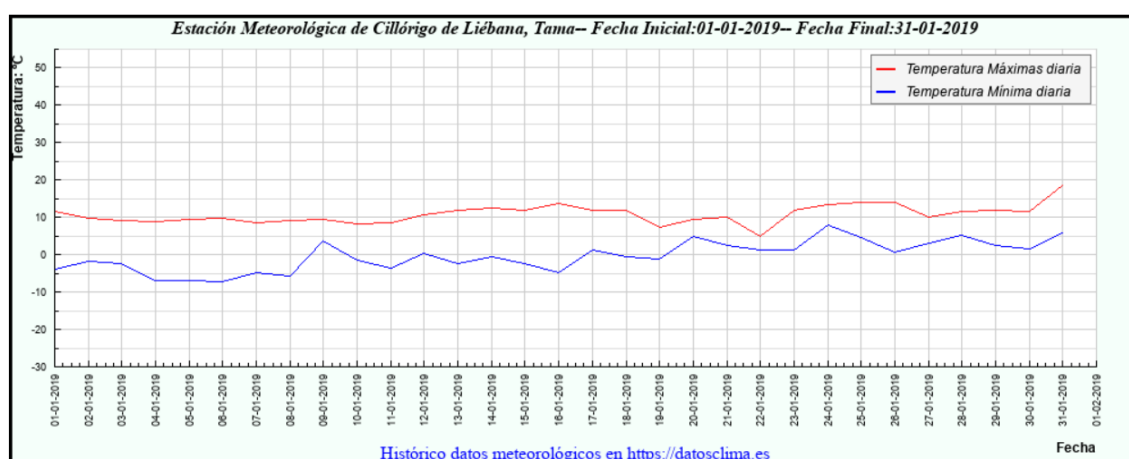


Figura 4. Detalle de la evolución diaria a lo largo del mes de enero de 2019 según datos clima.es

Estos datos se han incorporado a una hoja de cálculo Excel con el fin de poderlos incorporar al SIG y tratarlos en procesos sucesivos.

2.1.7. Herramientas de trabajo: SNAP y ArcGIS

Los programas con las que se ha procesado las imágenes de Sentinel-3 y los datos de AEMet son SNAP y ArcGIS. Se han utilizado de manera complementario aprovechando las capacidades de cada uno de ellos.

2.1.7.1. Procedimiento en SNAP

Mediante el empleo de SNAP se ha extraído la banda del radiómetro LST (banda 5) del conjunto de las bandas que componen la imagen (21 bandas), recortándola por el área de interés. Posteriormente, esta imagen fue transferida a ArcGIS para desarrollar la modelización geoestadística. El motivo principal por el que se ha hecho el tratamiento previo de las imágenes con SNAP y no directamente con ArcGIS es que SNAP está especialmente diseñado para trabajar con imágenes y productos Sentinel, poseyendo herramientas específicas para tratar algunos de sus datos. Además, SNAP al trabajar con la señal cruda directamente en binario, simplifica enormemente las operaciones de extracción y recorte, agilizando estos procesos. Recordemos que las imágenes Sentinel son muy pesadas (1,74 Gb de media), porque incorporan para cada pixel el nivel digital de resolución radiométrica y las coordenadas en el sistema de proyección. SNAP, puede trabajar directamente con las de imágenes comprimidas. Virtualmente se puede ver el contenido de las mismas y modificarlo sin alterar la imagen original. Una vez seleccionado el producto de trabajo, en nuestro caso la banda LST, se puede expandir la imagen y cargarla automáticamente en el visor. Mediante las herramientas del visor, y moviendo el cursor directamente sobre la imagen, SNAP aporta información de la temperatura registrada para cada pixel individualmente; también permite cambiar la escala de grises por otras de tipo cromático para facilitar la visualización de las temperaturas. Las imágenes seleccionadas, se almacenan en formato TIFF georreferenciado de alta capacidad (GeoTIFF/BigTIFF), lo que les permite ser directamente leídas por ArcGIS.

2.1.7.2. Procedimiento en ArcGIS

El procedimiento de trabajo en el SIG comenzó con la creación de una geodatabase, cuyo sistema de referencia es el oficial para Cantabria en España (ETRS89, zona 30 Norte). Todos los datos empleados, tanto con coordenadas geográficas (WGS84) como planas (UTM ED50 zona 30 Norte) fueron transformados al sistema de referencia de la geodatabase, empleando las herramientas de transformación 3D propias de ArcGIS.

Los datos incluidos en esta geodatabase, además de las imágenes Sentinel-3 son: Modelo Digital de Elevaciones a escala 1/25.000 para Cantabria (DCITIMAC, Universidad de Cantabria, año 1999) en formato Raster *.img; Límite Provincial de Cantabria (DCITIMAC, Universidad de Cantabria, año 2001) en formato vectorial *.shp; Cursos de

agua y límites hidrográficos (DCITIMAC, Universidad de Cantabria, año 2018) en formato vectorial *.shp; registros termométricos de las estaciones meteorológicas automáticas de la AEMet (descritas anteriormente) incorporados como registro ASCII en formato txt.

Para transformar los registros de las estaciones meteorológicas automáticas de formato texto a geográfico se llevaron a cabo una serie de operaciones. Inicialmente, las coordenadas geográficas de cada estación se transformaron a planas mediante una calculadora geográfica (ArcGeek, Ref[23]). Posteriormente, éstas se incorporaron al fichero de puntos txt (a partir de ese momento, las estaciones poseen coordenadas en un sistema de referencia plano). A continuación, los puntos de este sistema plano se transformaron al sistema de referencia de la geodatabase (ETRS89). Realizado este último paso las estaciones pueden ser visualizadas geográficamente en el SIG (Figura 5).



Figura 5. Distribución espacial de las estaciones automáticas nombradas empleadas en este proyecto, junto con el límite provincial de Cantabria. En rojo, estaciones pertenecientes al grupo proceso; en azul, estaciones pertenecientes al grupo control.

Mediante los registros de dichas estaciones se confeccionaron los diferentes modelos termométricos empleando procedimientos de interpolación. Para entender cómo funciona cualquier método de interpolación se debe incluir un concepto que hace referencia a cómo se denominan los elementos que participan en la interpolación espacial. Cualquier variable espacial z toma valores en función de su posición geográfica $z = f(x, y)$, siendo x e y las coordenadas respectivas de longitud y latitud de un punto. Dentro de un dominio espacial todos los puntos poseen posición espacial conocida. Algunos de ellos también poseen valor de la variable z . A dichos puntos se les ha denominado puntos conocidos. En cambio, el resto (que no tiene asignada dicha variable z) son puntos por conocer dicha variable. Los procedimientos de interpolación espacial permiten estimar los valores que alcanzará una variable z en el conjunto de puntos por conocer, a partir de sus coordenadas espaciales, y tomando como referencia el valor de dicha variable z en los puntos conocidos del dominio espacial. Los métodos

empleados en este trabajo son: inverso de la distancia ponderada (IDW), método Spline, y por último, ajuste adiabático seco. La base de dichos procedimientos se detalla a continuación.

Dado que se trata de un estudio termométrico para un periodo de tiempo, se ha creado un fichero de temperatura vectorial para cada una de las fechas de ese periodo. Cada fichero muestra el valor de las temperaturas en cada una de las estaciones analizadas y para cada fecha. Posteriormente, a partir de dichos puntos se generan los modelos de interpolación en formato Raster con un tamaño de malla equivalente al que poseen las imágenes Sentinel-3 (1x1 km), para poder ser comparados.

2.1.7.2.1. Modelo del inverso de la distancia ponderada (IDW)

El método de interpolación IDW asume que, los puntos conocidos que están más próximos entre sí aportan valores más parecidos de la variable interpolada, mientras que los que están más separados aportan valores menos semejantes. Para predecir el valor de un punto por conocer se emplean los puntos conocidos dentro de un círculo de confianza definido por el operador, a partir del inverso de la distancia al cuadrado.

La expresión que sigue este método para interpolar los valores del área de interés es la que se muestra en la Ec(1):

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{z_i}{d_i^p} \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (1)$$

Donde $i = 1, 2, 3 \dots N$, z_p el valor de la variable interpolada, z_i el valor conocido de la variable en el punto i -ésimo de referencia, d_i la distancia del i -ésimo punto conocido al punto interpolado y p la potencia con la que se desea trabajar, para este trabajo $p = 2$.

2.1.7.2.2 Modelo Spline

La forma de realizar la interpolación Spline guarda cierta similitud con IDW. Con base en el Teorema de Tales, como la mayoría de los métodos, los valores de los puntos por conocer se distribuyen a través de una función matemática que tiene en cuenta no solo el valor de la variable en los puntos conocidos sino su distancia, y si forman parte o no del mismo plano. Si no lo forman ajusta una función no es lineal que minimiza la curvatura a la distancia entre puntos minimizando la curvatura, dando como resultado una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada.

La expresión que sigue este método para llevar a cabo la interpolación se encuentra en la Ec(2):

$$S(x, y) = T(x, y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j) \quad (2)$$

Donde $j = 1, 2, 3 \dots N$, λ_j son coeficientes solución de se sistemas de ecuaciones lineales, r_j es la distancia del punto (x, y) al j -ésimo punto y $T(x, y)$ y $R(r_j)$ son funciones con distinta expresión en función de los ajustes seleccionados por el usuario.

2.1.7.2.3. Modelo adiabático seco

Este método se basa en la temperatura que mide diariamente una estación situada al nivel del mar (para este trabajo se toma la estación del aeropuerto de Santander) y consiste en aplicar una tasa lineal de descenso de las temperaturas al aumentar la altitud en la atmósfera (válido hasta alcanzar la tropopausa, situada a unos 15 Km de altitud) siguiendo la expresión de la ecuación Ec(3):

$$T(h) = T_0 - Lh \quad (3)$$

Donde $T(h)$ representa la temperatura a una altitud determinada, T_0 la temperatura a nivel del mar, h la altitud sobre el nivel del mar y L el gradiente adiabático seco con un valor de $6.5 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$. Ref[#].

2.1.7.2.4. Criterios de validación

Para comprobar si los resultados obtenidos se pueden validar mediante la señal de Sentinel-3, hay que confirmar que cumplen una serie de requisitos.

En primer lugar no debe haber grandes diferencias entre las temperaturas de estaciones a la misma altitud y latitud. En segundo lugar los valores registrados por las estaciones del grupo control y los medidos por Sentinel-3 no pueden presentar muchas diferencias para considerar que los datos son válidos.

Con estos requisitos cumplidos, se puede asegurar que no hay discrepancias entre las medidas registradas en el exterior del límite provincial de Cantabria y la señal de Sentinel-3, con lo que se puede comparar la señal de Sentinel-3 con los modelos termométricos elaborados en el SIG.

3. Resultados

3.1. Resultados de las medidas de las estaciones y la señal de Sentinel-3

Los datos de estaciones automáticas empleados se presentan en tablas de 1 al 8 de los anexos. Además de los valores de temperatura, se incluyen los nombres de las estaciones meteorológicas, sus coordenadas planas (Este, Norte) y altitud de la estación.

A pesar de que se había planteado calibrar la bondad de modelos termométricos a lo largo de cuatro semanas representativas de cada una de las estaciones del año, la disponibilidad final de imágenes Sentinel 3 sólo ha permitido llevar a cabo este proceso en algunos días de dichas semanas.

Para el invierno de 2019 se eligió la semana del 31 de diciembre de 2018 al 6 de enero de 2019, pero solo fue disponible encontrar imágenes para los días 1, 4, 5 y 6. Para la primavera de 2019 se eligió la semana del 8 al 14 de abril, pero solo fue disponible encontrar imágenes para los días 9, 12, 13 y 14. Para el verano de 2019 se eligió la semana del 15 al 21 de julio, pero solo fue disponible encontrar imágenes para los días 17, 18, 19, 20 y 21. Para el otoño de 2019 se eligió la semana del 23 al 29 de septiembre, pero solo fue disponible encontrar imágenes para los días 24, 25, 26 y 28. En cualquier caso como mínimo siempre hay 4 días por semana.

En la Figura 6 se presenta la distribución de temperaturas medias en cada una de las semanas del año elegidas.

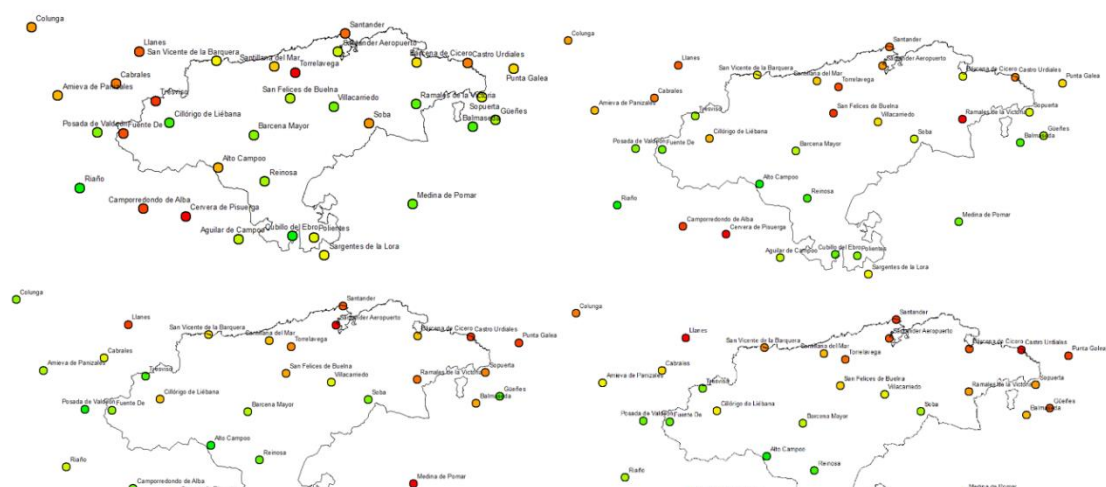


Figura 6. Temperaturas medias para cada semana del año. Esquina superior izquierda invierno, esquina superior derecha primavera, esquina inferior izquierda verano y esquina inferior derecha otoño.

La distribución de temperaturas en el grupo de control de la semana de invierno presenta una un rango de valores medios que oscila entre 282,2 K (9.05°C) para la estación de Cervera de Pisuerga (1140 metros de altitud sobre el nivel del mar (m.a.s.n.m)) y 275,8 K (2.65°C) para la estación de Balmaseda (210 m.a.s.n.m) durante dicha semana las medias muestran un claro proceso de inversión térmica. Respecto al grupo de proceso el valor más alto corresponde con 284,45K (11.3°C) para la estación de Torrelavega (110 m.a.s.n.m) , situada cerca de la costa; mientras que el valor más bajo fue de 275 K (1.85°C) para la estación de Cillorigo de Liébana (260 m.a.s.n.m) situada en la cordillera. Una de las estaciones de mayor altitud, 1100 m.a.s.n.m (Fuente De) registró 281,25 K (8.1°C) mostrando que en conjunto las estaciones de proceso manifiestan el mismo tipo de comportamiento de inversión térmica.

La distribución de temperaturas en el grupo de control de la semana de primavera presenta una un rango de valores medios oscila entre 285,05 K (11.9°C) para la estación de Punta Galea (90 m.a.s.n.m) y 279,23 K (6.08°C) para la estación de Camporredondo de Alba (210 m.a.s.n.m). Respecto al grupo de proceso el valor más alto corresponde con 285,25K (12.1°C) para la estación de Torrelavega (110 m.a.s.n.m), situada cerca de la costa; mientras que el valor más bajo fue de 277,31 K (4.16°C) para la estación de Alto Campoo (1650 m.a.s.n.m) situada en la cordillera. En esta semana se observa una clara correlación entre la altitud de la estación y la temperatura que se registra. Cuanta mayor es la altitud sobre el nivel del mar, menor es la temperatura registrada.

La distribución de temperaturas en el grupo de control de la semana de verano presenta una un rango de valores medios que oscila entre 296,18 K (23.03°C) para la estación de Medina de Pomar (580m.a.s.n.m) y 291,12 K (17.97°C) para la estación de Posada de Valdeón (953 m.a.s.n.m). Respecto al grupo de proceso el valor más alto corresponde con 291,12K (26.97°C) para la estación de Santander Aeropuerto (5 m.a.s.n.m) , situada en la costa; mientras que el valor más bajo fue de 289,43 K (16.27°C) para la estación de Alto Campoo (1650 m.a.s.n.m) situada en la cordillera. En esta semana también se observa una clara correlación entre la altitud de la estación y la temperatura que se registra. Cuanta mayor es la altitud sobre el nivel del mar, menor es la temperatura registrada.

La distribución de temperaturas en el grupo de control de la semana de otoño presenta una un rango de valores medios que oscila entre 293,31 K (20.16°C) para la estación de Llanes (10 m.a.s.n.m) y 285,11 K (12.96°C) para la estación de Sargentos de la Lora (1017 m.a.s.n.m). Respecto al grupo de proceso el valor más alto corresponde con 291,76K (18.61°C) para la estación de Castro Urdiales (45m.a.s.n.m) , situada cerca de la costa; mientras que el valor más bajo fue de 281,81 K (8.66°C) para la estación de Alto Campoo (1650 m.a.s.n.m) situada en la cordillera. En esta semana se observa una

clara correlación entre la altitud de la estación y la temperatura que se registra. Cuanta mayor es la altitud sobre el nivel del mar, menor es la temperatura registrada.

Para comprobar si estos datos son correctos se presenta la Figura 7 que muestra las temperaturas medias registradas cada semana por señal de Sentinel-3.

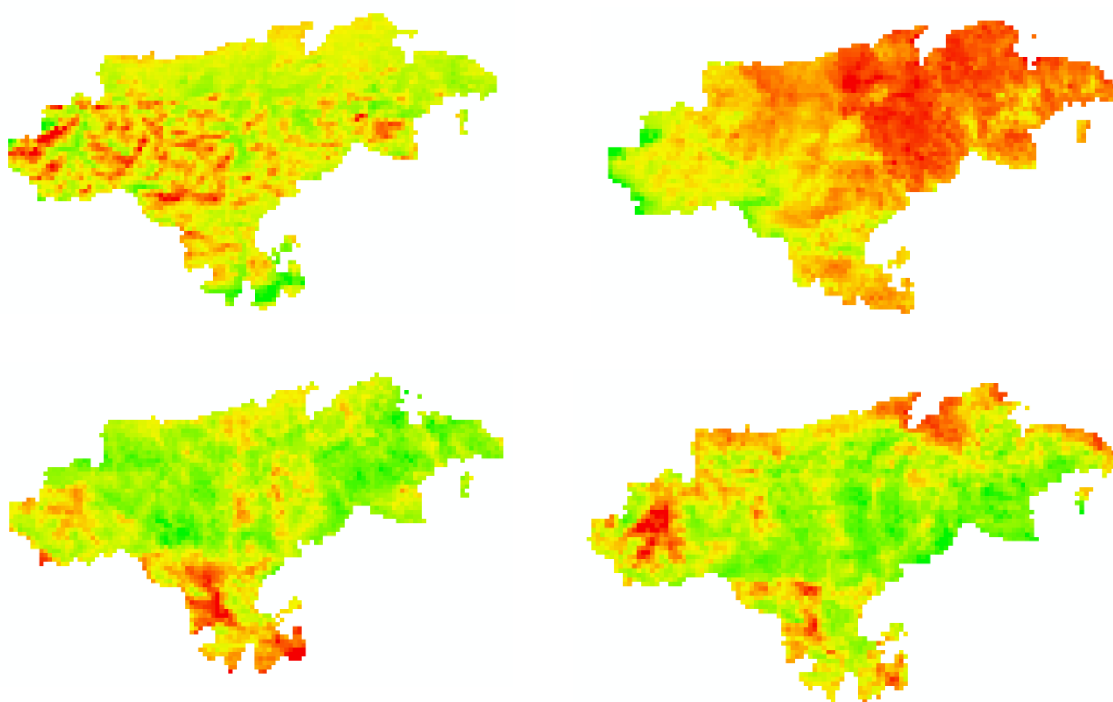


Figura 7. Lectura media del Radiómetro LST para las mismas semanas que los registros presentados anteriormente. El orden de las estaciones del año es el mismo que el de la anterior figura.

Como se observa de la lectura del radiómetro la tendencia registrada es coherente con la dinámica atmosférica de invierno de inversión térmica. En el caso de primavera, las mayores temperaturas se registran en la zona oriental, coincidiendo con los registros de las estaciones empleadas en este proyecto (Santander, Santander Aeropuerto, Ramales de la Victoria o Castro Urdiales). En la esquina inferior izquierda correspondiente al verano, es difícil apreciar patrones tanto para la señal de Sentinel-3 como para las medidas de las estaciones y dado que las escalas de temperaturas no son las mismas en cada imagen, hay que comparar los resultados para conocer las discrepancias entre ambas. En otoño se puede observar que las mayores temperaturas se registran para las zonas de la costa, lo cual se asemeja en gran medida a los datos de estaciones medidas.

A continuación se comparan los resultados de las medidas de las estaciones del grupo de control con la señal de Sentinel-3. Para realizar las comparaciones de las estaciones con Sentinel-3, se emplean las temperaturas medias de las estaciones del

grupo control, que aparecen en las tablas 9 a 12 en el anexo. Los resultados de dichas comparaciones se muestran en la tabla 13 del anexo.

A la vista de que las diferencias entre las temperaturas registradas por las estaciones del grupo control y las se obtienen por la señal de Sentinel-3 apenas difieren en cada una de las ubicaciones menos de 4K, se puede concluir que la señal Sentinel-3 es capaz de dar valores suficientemente precisos para los puntos del área de interés. Dado que las temperaturas de las estaciones del grupo control, tienen correlación con las estaciones del grupo proceso para las mismas épocas del año, es de esperar que la señal de Sentinel-3 sea útil para medir dentro del límite provincial de Cantabria.

Esto se puede comprobar comparando la señal de Sentinel con los distintos modelos estadísticos.

3.2. Resultados de cada modelo de interpolación

Para la elaboración de los modelos de temperatura por interpolación se han elegido los datos de temperatura de las estaciones pertenecientes al grupo proceso, que se encuentran en el anexo en las Tablas 1, 2, 3 y 4.

La figura 8 muestra los resultados de realizar una interpolación de tipo IDW a las temperaturas medias de cada estación del año.

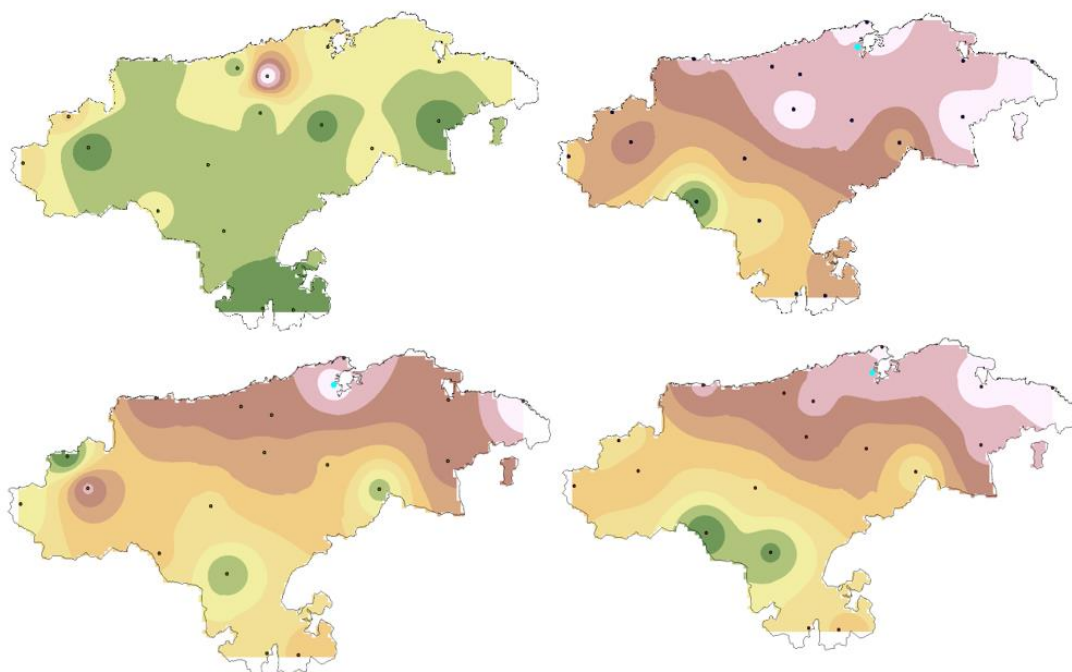


Figura 8. Modelo de interpolación IDW aplicado a los valores medios de las temperaturas de las estaciones del grupo proceso. Esquina superior izquierda invierno, esquina superior derecha primavera, esquina inferior izquierda verano y esquina inferior derecha otoño.

Para el modelo en invierno los valores máximos (284K) se encuentran en la zona circundante a Torrelavega (zona muy marcada por elipses concéntricas) y los mínimos (275K) tanto en el sur como por la zona de Fuente De. En el modelo de primavera (máximo 285K), se observa que las temperaturas son bastante uniformes con la única excepción de la estación de Alto Campoo que registra un mínimo (277K) que se destaca entre los demás (Elipse verde). Tanto en el modelo de verano (máximo 294K; mínimo 289K) como en el de otoño (máximo 291K; mínimo 281K), los valores más cálidos se localizan en la costa y aparecen puntos fríos en distintas zonas del interior.

A la vista de los resultados de los modelos de interpolación IDW para cada una de las cuatro estaciones del año, se observa que la interpolación destaca el valor de algunas estaciones, quedando valores rodeados por elipses concéntricas. Este efecto es debido a la proximidad espacial existente entre algunas de las estaciones elegidas para su confección y hace muy sencillo distinguir este modelo de los demás.

La Figura 9 muestra los resultados de aplicar la interpolación Spline a las estaciones del grupo proceso en las distintas estaciones del año.

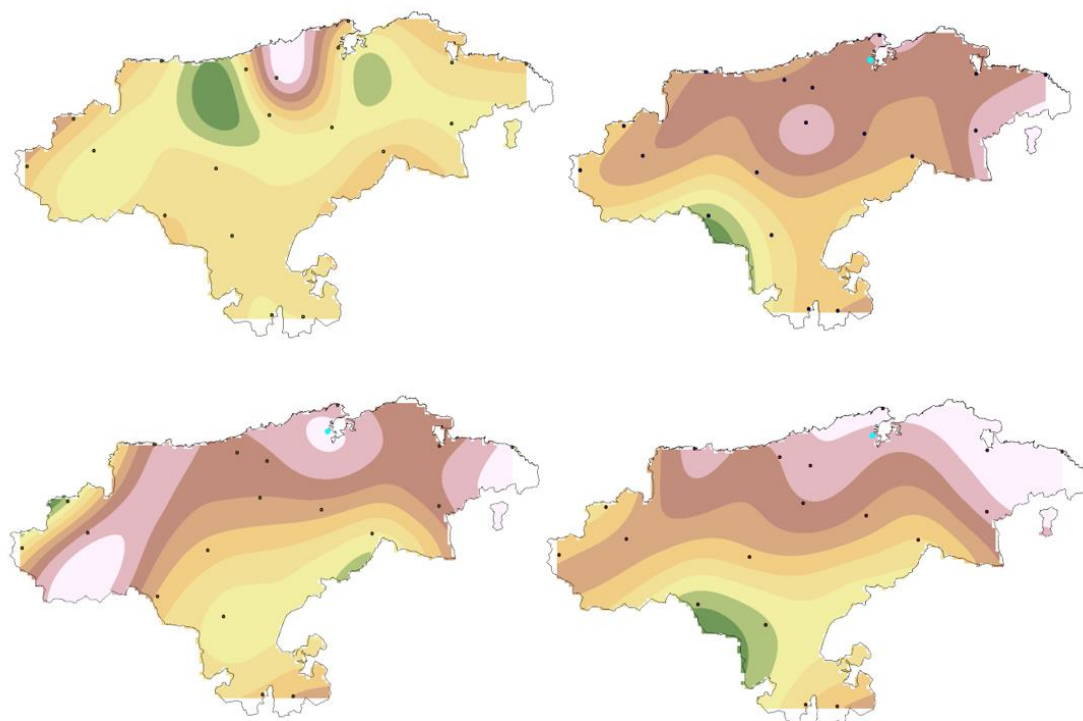


Figura 9. Modelo de interpolación Spline aplicado a los valores medios de las temperaturas de las estaciones del grupo proceso. Esquina superior izquierda invierno, esquina superior derecha primavera, esquina inferior izquierda verano y esquina inferior derecha otoño.

En el modelo Spline de invierno se destaca una zona caliente por la costa cercana a Torrelavega y en el resto de Cantabria los valores son suaves sin puntos de calor (máximo 284K) o de frío (mínimo 275K) muy marcados como pasaba en el modelo anterior. En primavera, el foco de calor se centra en San Felices de Buelna (285K) y en el extremo oriental, descendiendo a medida que se avanza hacia el sur (277K en Alto Campoo). De nuevo, igual que con el modelo IDW, en verano y otoño las temperaturas máximas se localizan en las costas. El hecho de que ambos modelos reflejen dicha tendencia implica que a pesar de emplear distintas expresiones matemáticas llegan a representar la realidad de manera similar.

En el caso de los modelos Spline, no se aprecian las elipses rodeando las estaciones con tanta frecuencia. En cambio se aprecia que las variaciones de temperatura son suaves y salvo en casos puntuales de temperaturas más extremas, las curvas que separan las franjas de temperatura están muy separadas. Esto se debe a que el método de interpolación Spline crea un modelo en el que se minimiza la curvatura de la superficie a interpolar mientras se obliga al modelo a pasar por los puntos medidos, haciendo que salvo en algunos casos de las temperaturas máximas y mínimas muy extremos, no se aprecien elipses concéntricas entorno a una estación.

Por último en los modelos termométricos, se muestra en la Figura 10 los resultados de aplicar el ajuste adiabático seco tomando como referencia el valor de la estación de Santander Aeropuerto por ser la más cercana al nivel del mar (altitud 5 m.a.s.n.m.).

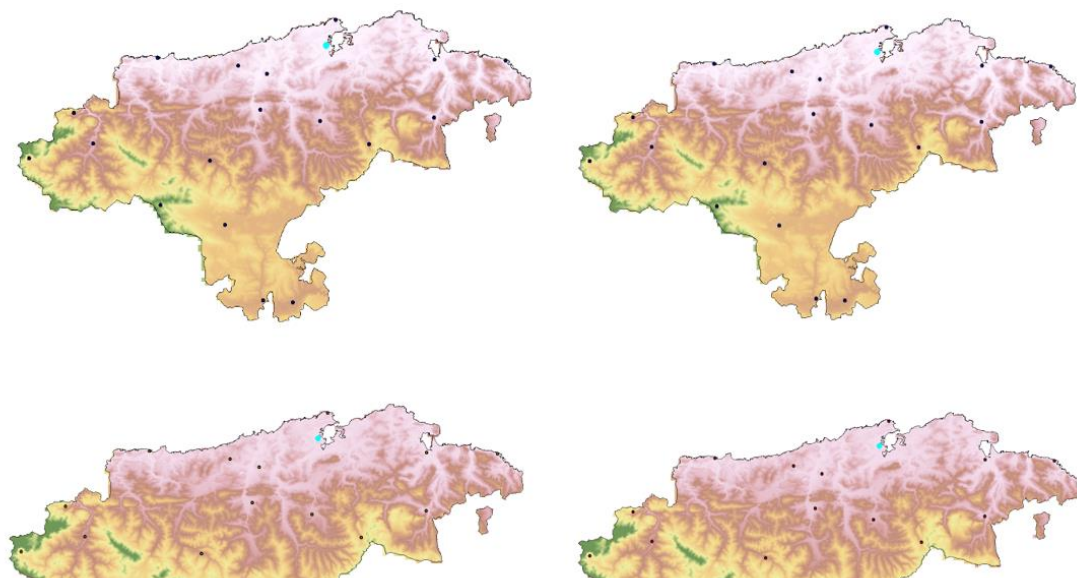


Figura 10. Modelo adiabático seco aplicado al valor medio de la estación seleccionada al nivel del mar en las cuatro estaciones del año. Esquina superior izquierda invierno, esquina superior derecha primavera, esquina inferior izquierda verano y esquina inferior derecha otoño.

En los cuatro modelos que se elaboran se puede apreciar que las temperaturas máximas se localizan en la costa. El hecho de que este método únicamente considere la altitud como variable de la temperatura hace que todos los modelos sean muy similares, si bien solo se pueden apreciar algunas diferencias en algunas zonas de interior que son más cálidas en verano y otoño que en las estaciones de invierno y primavera.

Los modelos adiabáticos son sin duda los más característicos de los tres. El aspecto de mapa topográfico, al tiempo que facilita distinguirlos de los otros modelos termométricos por tener detallado todo el territorio, dificulta distinguir entre las diferentes estaciones ya que las diferencias sólo se basan en la temperatura que se tiene a nivel del mar.

3.3. Comparación de modelos con Sentinel-3

En primer lugar es necesario recordar que la Figura 7 nos muestra los resultados de las medidas radiométricas en cada estación del año 2019. Si se hace una superposición de los modelos con la señal de Sentinel-3, se obtienen una serie de modelos de diferencias que permiten llevar a cabo comparaciones de manera visual y analítica.

En primer lugar se compara el método IDW con la señal de Sentinel-3. Las Figuras 11, 12, 13 y 14 muestran las comparaciones de los modelos IDW con Sentinel-3 para las estaciones de invierno, primavera, verano y otoño respectivamente.

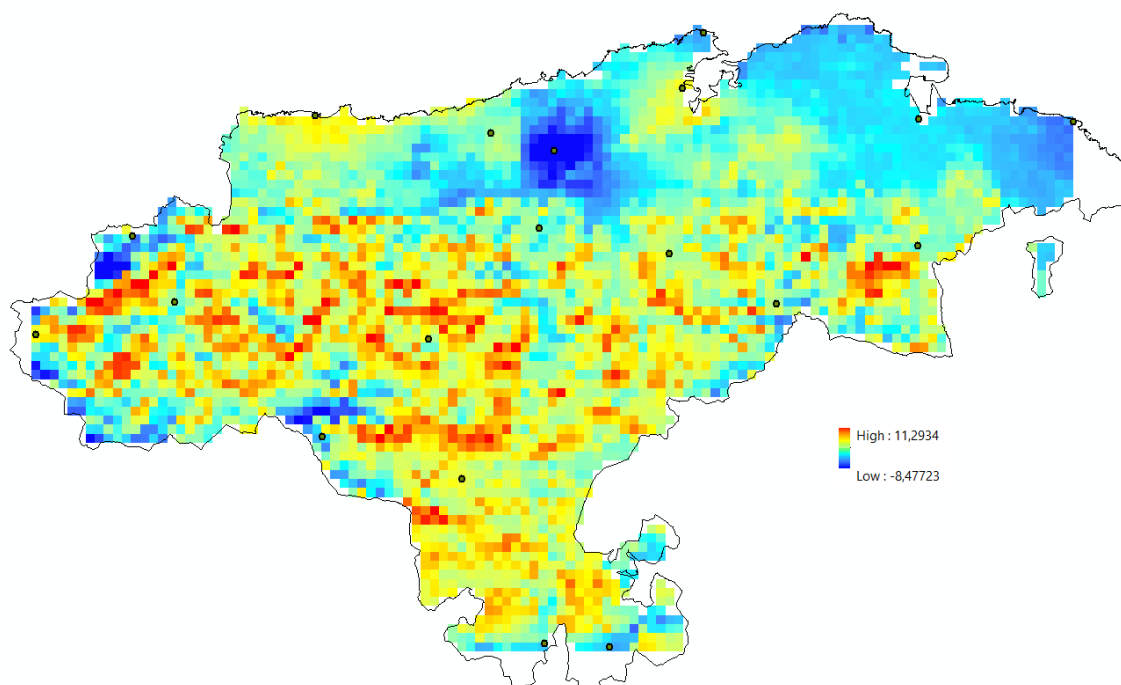


Figura 11. Diferencias entre IDW y Sentinel-3 en invierno. Las imágenes comparadas corresponden en ambos casos a la media de enero de 2019. Las diferencias de temperatura están medidas en K.

Aunque en el rango de temperaturas se aprecie una amplitud máxima de 19K, esta medida no representa la realidad, pues si bien puede haber puntos que si se diferencien en gran medida, en la mayor parte del área de la imagen las diferencias son nulas o ínfimas. Para ver esto se observa la tabla de atributos de la imagen generada que aparece en la Figura 12.

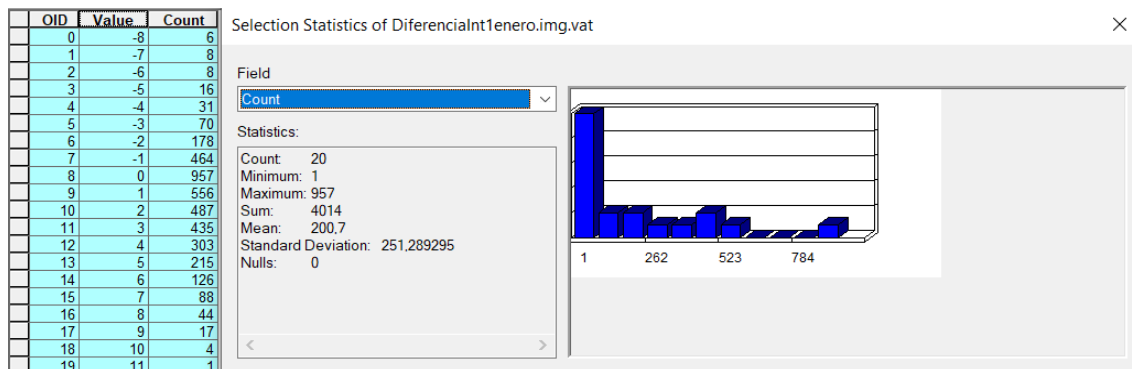


Figura 12. Tabla de atributos de las diferencias mostradas en la Figura 11 y estadísticas de los píxeles.

Como se puede ver en la Figura 12, de los más de cuatro mil píxeles estudiados, menos de 40 se encuentran en los valores más extremos, lo que apenas representa el 1% del total de la imagen. Por el contrario, en los valores centrales, si se analiza la cantidad de píxeles sin diferencia entre ambos modelos o con 1K de diferencia, se encuentra que representan aproximadamente el 50% por ciento de la imagen total. Con lo que se puede garantizar que la comparación avala el modelo IDW de invierno.

Si se repite este análisis para las otras tres estaciones restantes se obtienen las comparaciones de la Figura 13 y las estadísticas que se incluyen posteriormente.

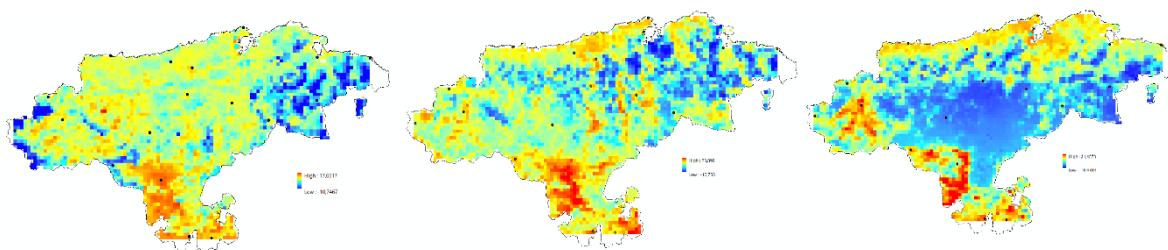


Figura 13. De izquierda a derecha muestra las comparaciones de las estaciones de primavera verano y otoño. El rango de diferencia en el modelo de primavera es de 27K (con máximo de 10K de diferencia), pero los píxeles correspondientes a los máximos de diferencia representan apenas el 3% del total mientras que los valores centrales sobrepasan el 55%. El rango de diferencia en el modelo de verano es de 33K (con máximo de diferencia de 16K), pero los píxeles de correspondientes a los máximos de diferencia representan el 5% de la imagen mientras que los píxeles centrales llegan el 60%. El rango de diferencia en el modelo de otoño es de 31K (con máximo de diferencia 21K), pero los píxeles correspondientes a los máximos de diferencia representan apenas el 2% del total mientras que los valores centrales son el 50%.

Para el modelo Spline se sigue el ejemplo del modelo IDW, y se comparan directamente las cuatro estaciones en la Figura 14.

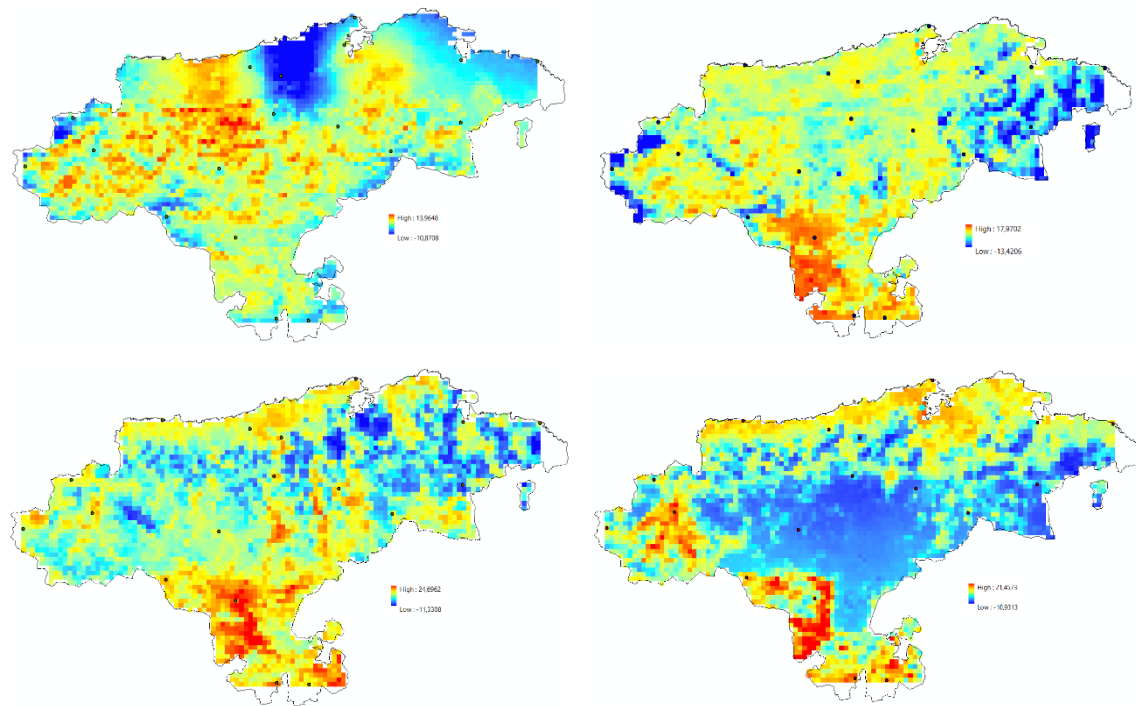


Figura 14. En la esquina superior izquierda invierno, en la superior derecha primavera, en la inferior izquierda verano y en la inferior derecha otoño. El rango de diferencia del modelo de invierno es de 23K (máximo de 13K), pero los pixeles correspondientes a los máximos de diferencia representan el 2%, mientras que los pixeles centrales abarcan el 45%. El rango de diferencia en el modelo de primavera es de 30K (máximo de 17K), pero los pixeles correspondientes a los máximos de diferencia representan apenas el 1% del total mientras que los pixeles centrales sobrepasan el 65%. El rango de diferencia en el modelo de verano es de 35K (máximo de 24K), pero los pixeles de correspondientes a los máximos de diferencia representan el 3% de la imagen mientras que los pixeles centrales llegan el 50%. El rango de diferencia en el modelo de otoño es de 31K (con máximo de diferencia 21K), pero los pixeles correspondientes a los máximos de diferencia representan apenas el 1% del total mientras que los pixeles centrales son el 45%.

Tanto en el modelo IDW como en Spline, existen pixeles que difieren en gran medida con la señal de Sentinel. Esto es debido a que estos interpoladores no poseen información acerca de las condiciones del terreno y tienden a minimizar curvaturas, con lo que pierden precisión en zonas montañosas. Aun así, logran un porcentaje de acierto muy positivo.

En la Figura 15 se muestran las comparaciones para cada estación del modelo adiabático con la señal de Sentinel-3.

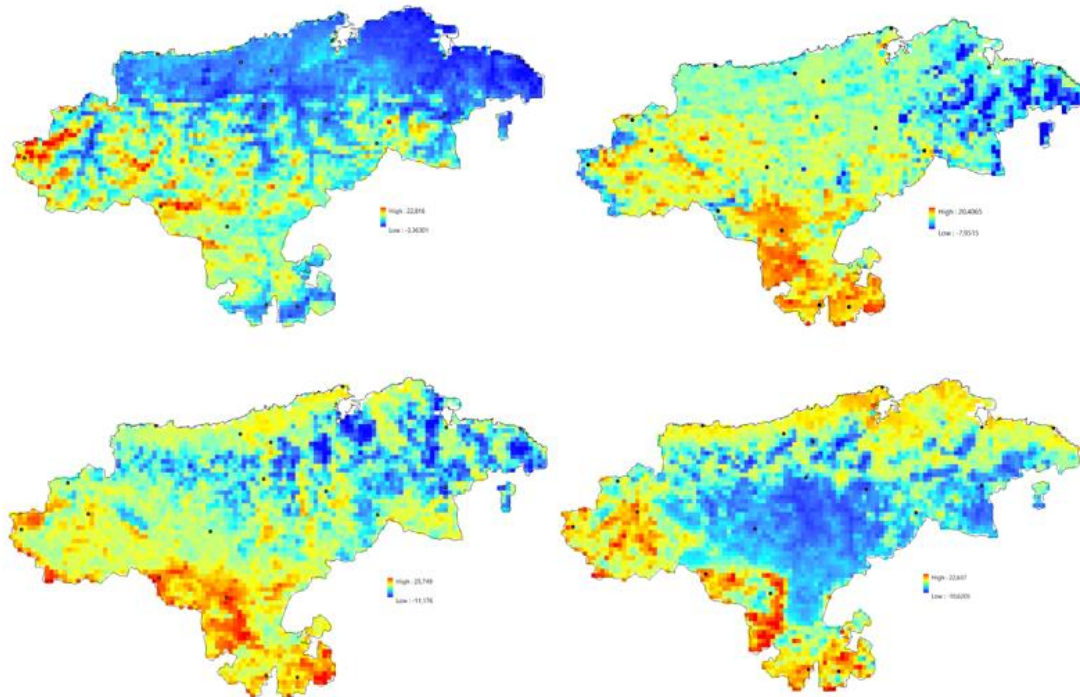


Figura 15. En la esquina superior izquierda invierno, en la superior derecha primavera, en la inferior izquierda verano y en la inferior derecha otoño. El rango de diferencia del modelo de invierno es de 25K (máximo de 22K), pero los pixeles correspondientes a los máximos de diferencia representan el 2%, mientras que los pixeles de mínima diferencia abarcan el 50%. El rango de diferencia en el modelo de primavera es de 27K (máximo de 20K), pero los pixeles correspondientes a los máximos de diferencia representan apenas el 2% del total mientras que los pixeles de mínima diferencia sobrepasan el 55%. El rango de diferencia en el modelo de verano es de 36K (máximo de 25K), pero los pixeles de correspondientes a los máximos de diferencia representan el 2% de la imagen mientras que los pixeles centrales llegan el 60%. El rango de diferencia en el modelo de otoño es de 32K (con máximo de diferencia 22K), pero los pixeles correspondientes a los máximos de diferencia representan apenas el 1% del total mientras que los pixeles de mínima diferencia son el 45%.

Al analizar el modelo adiabático seco comparándolo con el de Sentinel-3, se aprecia que al contrario que los métodos de interpolación, en este caso sí que se tiene presente la topografía a la hora de dar los valores de temperatura. Sin embargo, al no interpolar al terreno, se pierde parte de la ventaja obtenida con respecto a los otros modelos empleados.

4. Conclusiones

Como primer objetivo específico marcado para este proyecto se encontraba el descargar las imágenes de Sentinel-3 necesarias para poder construir modelos radiométricos. Este objetivo se vio conseguido al elaborar la Figura 7, que muestra la señal de Sentinel para las distintas estaciones del año centrándose en el registro del interior de Cantabria.

Al elaborar la Hoja Excel y las posteriores tablas incluidas en el Anexo de este proyecto se completaba el segundo de los objetivos específicos. Con la incorporación de modelos digitales de Cantabria se construyó la geodatabase sobre la que posteriormente se trabajó en el SIG para elaborar modelos termométricos y establecer comparaciones.

Mediante los métodos de interpolación y el ajuste adiabático seco se elaboraron tres modelos termométricos en ArcGIS para ser calibrados posteriormente con la señal de Sentinel-3 y así estar más cerca del objetivo general.

Una vez analizadas las diferencias que se encuentran entre los modelos y la señal de Sentinel-3 y confirmando que las discrepancias encontradas, en ningún caso llegan a ser significativas, se puede dar por cumplido el objetivo final de este proyecto, es decir, se han validado correctamente los modelos termométricos elaborados con datos de AEMet mediante procesos de interpolación/estadísticos con la señal registrada por el instrumento SLSTR incorporado a bordo de los satélites de la misión Sentinel-3.

5. Referencias bibliográficas

Ref [1] BRUNET M.; AGUILAR E.; SALADIE O. et al. "EVOLUCIÓN TÉRMICA RECIENTE DE LA REGIÓN CATALANA A PARTIR DE LA CONSTRUCCIÓN DE SERIES CLIMÁTICAS REGIONALES".

https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/9270/5/0009_PU-SA-I-99-M_BRUNET.pdf

Ref [2] BOHIGAS M.; VILA H.; ORTEGA A. et al. "Series termométricas de los oasis cultivados de Mendoza y San Juan [Argentina] Problemas de temporalidad".

https://feminismo.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/11012/10-series-termomtricas-de-los-oasis-cultivados.pdf

Ref[3] MORÁN LÓPEZ R.; SÁNCHEZ GUZMÁN J. M.; PÉREZ MAYO D. ELABORACIÓN DEL "ATLAS CLIMÁTICO DE EXTREMADURA MEDIANTE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA" <http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/viewFile/312/179>

Ref[4] SANZ DONAIRE J. J.; AUTORREGULACIÓN FRENTE A "CAMBIO CLIMÁTICO": USO DE MODELOS NO LINEALES CON LAS TEMPERATURAS.

<http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/1511/199700.pdf?sequence=1>

Ref[5] <http://www.aemet.es/>

Ref[6] <https://meteofrance.com/>

Ref[7] <https://www.meteoitalia.it/>

Ref[8] LORENZ P.; JACOB D.; "Influence of regional scale information on the global circulation: A two-way nesting climate simulation"

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005GL023351>

Ref[9] LIU F.; HAO H.; MURAYAMA Y. "Spatial Interconnections of Land Surface Temperatures with Land Cover/Use: A Case Study of Tokyo"

<https://www.mdpi.com/2072-4292/13/4/610>

Ref[10] CALVO SANCHEZ F. J. "MODELOS ATMOSFÉRICOS" http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/Fisica_del_caos_en_la_prediccion_meteo/10_Modelos_atmosfericos.pdf

Ref[11] HAGEN S. C.; ZHANG F.; ZHANG H.; et al. "Snow cover and runoff modelling in a high mountain catchment with scarce data: effects of temperature and precipitation parameters" <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.10125>

- Ref[12] LÖFFLER J.; RÖßLER O. "Potentials and limitations of modelling spatio-temporal patterns of soil moisture in a high mountain catchment using WaSiM-ETH"
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.7663>
- Ref[13] LONG Z; YANG J.; ZHOU J. et al. "Investigation and validation of algorithms for estimating land surface temperature from Sentinel-3 SLSTR data"
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243419313881>
- Ref[14] FRERY M.L.; SIMEÓN M.; GOLDSTEIN C. et al. "Sentinel-3 Microwave Radiometers: Instrument Description, Calibration and Geophysical Products Performances" <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/16/2590>
- Ref[15] NIE J.; REN H.; ZHENG Y. et al. "Land Surface Temperature and Emissivity Retrieval From Nighttime Middle-Infrared and Thermal-Infrared Sentinel-3 Images"
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9093031>
- Ref[16] <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions>
- Ref[17] «Copernicus: Sentinel-3». European Space Agency. 2015.
- Ref[18] «Sentinel 3». European Space Agency. 2015.
- Ref[19] <https://www.onda-dias.eu/cms/es/data/catalogue/sentinel-3/#:~:text=Lanzamiento%3A%20Sentinel-3A%20el%2016%20de%20febrero%20de%202016%2C,frecuencia%20de%20paso%20de%2027%20d%C3%ADas%20%28385%20%C3%B3rbitas%29>
- Ref[20] «SLSTR». <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-slstr/instrument>
- Ref [21] <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.
- Ref [22] «Datos Clima». <https://datosclima.es/Aemet2013/Temperatura2013.php>.
- Ref [23] <https://franzpc.com/apps/conversor-coordenadas-geograficas-utm.html>.
- Ref [24] GUTIÉRREZ GARCÍA, C.; AGUAYO DÍAZ, A.; FERNÁNDEZ FREIRE, C. Proyecto Yuri. 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.31978/666-20-017-8>.

Anexo

Se presentan aquí las medidas registradas de las estaciones de los grupos proceso y control.

Tabla 1. Datos de temperatura de las estaciones del grupo proceso para los días correspondientes a la semana de invierno de 2019 elegida. Los campos son: altitud de la estación (m), coordenadas planas (Este y Norte) y los días en los que se ha medido.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	ENERO 1	ENERO 4	ENERO 5	ENERO 6
Alto Campoo	1650	388027,2	4765803,2	279,8	277,4	279,0	277,2
Bárcena de Cicero	10	461960,9	4804972,6	279,7	276,9	277,5	277,2
Fuente De Castro	1100	352587,1	4778388,6	281,8	280,9	281,6	280,6
Urdiales	45	481058,6	4804676,1	280,7	279,0	279,3	280,2
Cillórigo de Liébana	260	369837,3	4782357,5	276,9	274,2	274,4	274,4
Bárcena Mayor	460	401270,9	4777848,4	278,3	275,1	276,6	274,8
Ramales de la Victoria	80	461782,7	4789332,9	277,2	274,5	274,5	273,9
Reinosa	870	405392,2	4760573,7	278,3	274,8	276,1	275,9
San Felices de Buelna	105	414907	4791548,3	278,6	276,5	277,4	276,4
San Vicente de la Barquera	40	387248,1	4805436,5	278,7	277	277,9	277,5
Santander	52	435270	4815665,4	282	280,0	280,2	280,3
Santander Aeropuerto	5	432708,3	4808810,5	279,7	276,8	277,3	276,8

Santillana del Mar	150	408910,7	4803320	278,9	276,9	278	277,6
Soba	700	444271,8	4782204,3	280,3	279,5	280,2	277,7
Torrelavega	110	416738,6	4801151,8	289	284,7	281,1	282,9
Tresviso	940	364581,2	4790576,5	282,4	281,5	283,0	280,8
Cubillo del Ebro	770	415605,8	4740201,8	277,5	274,2	274,0	274
Polientes	720	423641,4	4739737,9	277,7	274,6	274,5	284,1
Villacarriedo	190	431039,4	4788434,2	277,4	274,9	276	275,3

Tabla 2. Datos de temperatura de las estaciones del grupo proceso para los días correspondientes a la semana de primavera de 2019 elegida. Los campos son: altitud de la estación (m), coordenadas planas (Este y Norte) y los días en los que se ha medido.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	ABRIL 9	ABRIL 12	ABRIL 13	ABRIL 16
Alto Campoo	1650	388027,2	4765803,2	274,8	275,8	280,1	278,5
Bárcena de Cicero	10	461960,9	4804972,6	284,8	283,1	282	285,2
Fuente De Castro	1100	352587,1	4778388,6	279,3	280,6	284,7	283
Urdiales	45	481058,6	4804676,1	284,9	284,5	284,1	285,9
Cillórgo de Liébana	260	369837,3	4782357,5	282,6	282,6	285,1	287,5
Bárcena Mayor	460	401270,9	4777848,4	280,7	281,7	283,6	285,1
Ramales de la Victoria	80	461782,7	4789332,9	284,9	284,6	285,0	288,4
Reinosa	870	405392,2	4760573,7	279	279,0	281,3	284,2
San Felices de Buelna	105	414907	4791548,3	283,7	284,8	284,9	287,9

San Vicente de la Barquera	40	387248,1	4805436,5	284,2	283,0	283,6	284,5
Santander	52	435270	4815665,4	285,9	284,7	283,9	285,5
Santander Aeropuerto	5	432708,3	4808810,5	284,5	283,8	283,8	286,1
Santillana del Mar	150	408910,7	4803320	283,7	282,9	284,9	285,7
Soba	700	444271,8	4782204,3	281,1	281,4	285,0	284,7
Torrelavega	110	416738,6	4801151,8	285,2	283,6	285,6	286,5
Tresviso	940	364581,2	4790576,5	279,9	281	286	282,2
Cubillo del Ebro	770	415605,8	4740201,8	279,8	280,6	281,6	284,5
Polientes	720	423641,4	4739737,9	280,6	281,3	282,2	284,2
Villacarriedo	190	431039,4	4788434,2	283,8	282,9	283,4	286,3

Tabla 3. Datos de temperatura de las estaciones del grupo proceso para los días correspondientes a la semana de verano de 2019 elegida. Los campos son: altitud de la estación (m), coordenadas planas (Este y Norte) y los días en los que se ha medido.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	JULIO 17	JULIO 18	JULIO 19	JULIO 20	JULIO 21
Alto Campoo	1650	388027,2	4765803,2	286,2	290,9	288,3	287,75	293,8
Bárcena de Cicero	10	461960,9	4804972,6	291,7	292,95	292,5	294,1	294,5
Fuente De	1100	352587,1	4778388,6	289,6	289,5	293,3	291,05	291,5

Castro Urdiales	45	481058,6	4804676,1	293,9	294,9	293,7	293,7	294,7
Cillórigo de Liébana	260	369837,3	4782357,5	292,5	293,4	293,0	293,4	293,4
Bárcena Mayor	460	401270,9	4777848,4	290,5	290,6	292,4	292,15	291,5
Ramales de la Victoria	80	461782,7	4789332,9	293,2	292,7	292,9	294,7	294,2
Reinosa	870	405392,2	4760573,7	289,2	288,5	288,2	292,8	290,7
San Felices de Buelna	105	414907	4791548,3	292,8	292,1	293,2	293,5	294,7
San Vicente de la Barquera	40	387248,1	4805436,5	292,5	293,2	292,4	292,35	293,6
Santander	52	435270	4815665,4	294,1	293,9	293,3	293,15	294,4
Santander Aeropuerto	5	432708,3	4808810,5	294,0	294,6	294,7	293,45	294,5
Santillana del Mar	150	408910,7	4803320	293,7	293,1	292,5	292,55	294
Soba	700	444271,8	4782204,3	290,9	288,8	290,0	292,35	290,7
Torrelavega	110	416738,6	4801151,8	293,8	293,0	293,3	293,4	294,1
Tresviso	940	364581,2	4790576,5	290,2	287,6	289,2	291,85	289,0
Cubillo del Ebro	770	415605,8	4740201,8	290,1	290,3	291,6	294,05	292,6
Polientes	720	423641,4	4739737,9	292,6	291,1	291,9	294,35	294
Villacarriedo	190	431039,4	4788434,2	292	291,6	292,6	292,45	293,1

Tabla 4. Datos de temperatura de las estaciones del grupo proceso para los días correspondientes a la semana de otoño de 2019 elegida. Los campos son: altitud de la estación (m), coordenadas planas (Este y Norte) y los días en los que se ha medido.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	SEP 24	SEP 25	SEP 26	SEP 28
Alto Campoo	1650	388027,2	4765803,2	285,7	279,5	279,5	282,5
Bárcena de Cicero	10	461960,9	4804972,6	290,9	291	289,8	290,5
Fuente De Castro	1100	352587,1	4778388,6	289,0	284,2	284,4	286,4
Urdiales	45	481058,6	4804676,1	292,2	292,6	291,3	290,9
Cillóriga de Liébana	260	369837,3	4782357,5	290,5	290,1	290,05	287
Bárcena Mayor	460	401270,9	4777848,4	287,9	287,4	287,55	286,2
Ramales de la Victoria	80	461782,7	4789332,9	291,2	289,7	290,15	289,2
Reinosa	870	405392,2	4760573,7	284,1	284,7	285,8	283,2
San Felices de Buelna	105	414907	4791548,3	290,4	289,7	290,35	288,7
San Vicente de la Barquera	40	387248,1	4805436,5	290,4	291,1	291,2	289,2
Santander	52	435270	4815665,4	291,9	291,7	291,4	290,4
Santander Aeropuerto	5	432708,3	4808810,5	290,7	290,2	291,75	289,5
Santillana del Mar	150	408910,7	4803320	290,3	290,5	290,05	288,8
Soba	700	444271,8	4782204,3	289	288,2	285,25	285,5
Torrelavega	110	416738,6	4801151,8	291,1	290,8	290,7	289,5
Tresviso	940	364581,2	4790576,5	288,4	288,3	285,1	285,3
Cubillo del Ebro	770	415605,8	4740201,8	289,1	286,2	287,15	285,4
Polientes	720	423641,4	4739737,9	289,3	287,9	288,2	286,4
Villacarriedo	190	431039,4	4788434,2	289,4	289	289,1	287,4

Tabla 5. Datos de temperatura de las estaciones del grupo control para los días correspondientes a la semana de invierno de 2019 elegida. Los campos son: altitud de la estación (m), coordenadas planas (Este y Norte) y los días en los que se ha medido.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	ENERO 1	ENERO 4	ENERO 5	ENERO 6
Llanes	10	358492,6	4808971,6	281,2	281,3	281,2	280,3
Cabrales	458	349745,7	4797030,9	281,2	278,9	281,7	278,9
Amieva de Panizales	370	328016,6	4792608,8	279,1	278,3	280,1	278,2
Colunga	30	318299,8	4817961,6	281,6	279,6	278,9	278,3
Riaño	1090	336259	4758143	274,1	275,8	275,7	274,6
Camporredondo de Alba	1575	360084,7	4750455,8	282,5	281,0	283,0	280,8
Aguilar de Campoo	910	395576,1	4739087,7	278,4	276,4	276,9	275,5
Sargentos de la Lora	1017	427615	4733093,3	279,5	277,6	278,9	278,4
Balmaseda	210	482956	4780886,8	276	275,5	275,5	276,1
Sopuerta	177	486319,3	4791892	277,7	277,6	278,2	278,5
Medina de Pomar	580	460598,5	4752044	278,1	275,1	275,1	275,1
Güeñes	208	491492,5	4783400,3	275,5	276,5	276,1	277,1
Cervera de Pisuerga	1140	375846,4	4747560,9	282,6	281,5	283,0	281,6
Posada de Valdeón	953	342922,5	4778758,9	276,9	276,2	275,9	275,1
Punta Galea	90	498244,8	4802459,5	280,7	278	277,8	278,4

Tabla 6. Datos de temperatura de las estaciones del grupo control para los días correspondientes a la semana de primavera de 2019 elegida. Los campos son: altitud de la estación (m), coordenadas planas (Este y Norte) y los días en los que se ha medido.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	ABRIL 9	ABRIL 12	ABRIL 13	ABRIL 14
Llanes	10	358492,6	4808971,6	284,4	283,8	285,2	285
Cabrales	458	349745,7	4797030,9	282,9	283,7	287,7	285,3
Amieva de Panizales	370	328016,6	4792608,8	284,1	283,4	287,7	285
Colunga	30	318299,8	4817961,6	284,1	283	283,7	284,6
Riaño	1090	336259	4758143	277,9	280,1	281,8	281,4
Camporredondo de Alba	1575	360084,7	4750455,8	275,0	279,4	282	280,5
Aguilar de Campoo	910	395576,1	4739087,7	279,5	279,7	281,4	283,9
Sargentos de la Lora	1017	427615	4733093,3	278,6	280,7	281,8	282,5
Balmaseda	210	482956	4780886,8	283,5	283,7	283,7	286,7
Sopuerta	177	486319,3	4791892	285,1	283,6	285,7	296,7
Medina de Pomar	580	460598,5	4752044	280,8	281,2	283,1	285,7
Güeñes	208	491492,5	4783400,3	283,2	283,5	283,8	287
Cervera de Pisuerga	1140	375846,4	4747560,9	286,3	285,5	281,0	282,4
Posada de Valdeón	953	342922,5	4778758,9	279,1	279,2	284,1	282,7
Punta Galea	90	498244,8	4802459,5	285,4	284,0	284,1	286,5

Tabla 7. Datos de temperatura de las estaciones del grupo control para los días correspondientes a la semana de verano de 2019 elegida. Los campos son: altitud de la estación (m), coordenadas planas (Este y Norte) y los días en los que se ha medido.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	JULIO 17	JULIO 18	JULIO 19	JULIO 20	JULIO 21
Llanes	10	358492,6	4808971,6	295,4	294,2	293,6	294,8	294,8
Cabrales	458	349745,7	4797030,9	296,7	292,9	293,3	293,0	293
Amieva de Panizales	370	328016,6	4792608,8	295,7	292,3	292,6	293,2	292,3
Colunga	30	318299,8	4817961,6	295,1	291,7	292	293,2	293,3
Riaño	1090	336259	4758143	296,6	290,3	292,6	294,4	294,8
Camporredondo de Alba	1575	360084,7	4750455,8	295,6	290,7	292,8	293	292,3
Aguilar de Campoo	910	395576,1	4739087,7	297,5	290,7	294,3	293,0	294,8
Sargentos de la Lora	1017	427615	4733093,3	298,7	289,3	294,2	293,5	294,7
Balmaseda	210	482956	4780886,8	299,4	292,3	290	295	294,3
Sopuerta	177	486319,3	4791892	297,8	292,5	294,3	294,4	293,4
Medina de Pomar	580	460598,5	4752044	301,6	292,2	296,2	294,6	296,2
Güeñes	208	491492,5	4783400,3	298,0	287,6	294,6	288,9	293,4
Cervera de Pisuerga	1140	375846,4	4747560,9	294,5	292	297,3	294,1	294,8
Posada de Valdeón	953	342922,5	4778758,9	293,1	288,5	292,4	290	291,5
Punta Galea	90	498244,8	4802459,5	296,4	293,9	293,2	295,0	294,3

Tabla 8. Datos de temperatura de las estaciones del grupo control para los días correspondientes a la semana de otoño de 2019 elegida. Los campos son: altitud de la estación (m), coordenadas planas (Este y Norte) y los días en los que se ha medido.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	SEP 24	SEP 25	SEP 26	SEP 28
Llanes	10	358492,6	4808971,6	284,4	283,8	285,2	285
Cabrales	458	349745,7	4797030,9	282,9	283,7	287,7	285,3
Amieva de Panizales	370	328016,6	4792608,8	284,1	283,4	287,7	285
Colunga	30	318299,8	4817961,6	284,1	283	283,7	284,6
Riaño	1090	336259	4758143	277,9	280,1	281,8	281,4
Camporredondo de Alba	1575	360084,7	4750455,8	275,0	279,4	282	280,5
Aguilar de Campoo	910	395576,1	4739087,7	279,5	279,7	281,4	283,9
Sargentos de la Lora	1017	427615	4733093,3	278,6	280,7	281,8	282,5
Balmaseda	210	482956	4780886,8	283,5	283,7	283,7	286,7
Sopuerta	177	486319,3	4791892	285,1	283,6	285,7	296,7
Medina de Pomar	580	460598,5	4752044	280,8	281,2	283,1	285,7
Güeñes	208	491492,5	4783400,3	283,2	283,5	283,8	287
Cervera de Pisuerga	1140	375846,4	4747560,9	286,3	285,5	281,0	282,4
Posada de Valdeón	953	342922,5	4778758,9	279,1	279,2	284,1	282,7
Punta Galea	90	498244,8	4802459,5	285,4	284,0	284,1	286,5

Tabla 9. Datos de temperaturas medias de las estaciones del grupo control correspondientes a la semana la semana del 31 de diciembre de 2018 al 6 de enero de 2019.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	MEDIA	SD
Llanes	10	358492,6	4808971,6	281,025	0,45552168
Cabrales	458	349745,7	4797030,9	280,2	1,48940704
Amieva de Panizales	370	328016,6	4792608,8	278,9375	0,88447254
Colunga	30	318299,8	4817961,6	279,6125	1,42733726
Riaño	1090	336259	4758143	275,0625	0,84987744
Camporredondo de Alba	1575	360084,7	4750455,8	281,8625	1,08041273
Aguilar de Campoo	910	395576,1	4739087,7	276,85	1,21380943
Sargentos de la Lora	1017	427615	4733093,3	278,65	0,80415587
Balmaseda	210	482956	4780886,8	275,8	0,29154759
Sopuerta	177	486319,3	4791892	278,0125	0,40901304
Medina de Pomar	580	460598,5	4752044	275,875	1,48352059
Güeñes	208	491492,5	4783400,3	276,325	0,67391889
Cervera de Pisuerga	1140	375846,4	4747560,9	282,2	0,74498322
Posada de Valdeón	953	342922,5	4778758,9	276,05	0,72915476

Punta Galea	90	498244,8	4802459,5	278,725	1,34008706
-------------	----	----------	-----------	---------	------------

Tabla 10. Datos de temperaturas medias de las estaciones del grupo control correspondientes a la semana la semana del 8 al 14 de abril de 2019.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	MEDIA	SD
Llanes	10	358492,6	4808971,6	284,6125	0,61152133
Cabrales	458	349745,7	4797030,9	284,9375	2,11359686
Amieva de Panizales	370	328016,6	4792608,8	285,05	1,88414437
Colunga	30	318299,8	4817961,6	283,875	0,69101375
Riaño	1090	336259	4758143	280,3375	1,77968864
Camporredondo de Alba	1575	360084,7	4750455,8	279,2375	2,98813626
Aguilar de Campoo	910	395576,1	4739087,7	281,1375	2,02541148
Sargentos de la Lora	1017	427615	4733093,3	280,925	1,67854103
Balmaseda	210	482956	4780886,8	284,425	1,55161206
Sopuerta	177	486319,3	4791892	287,8125	5,99046117
Medina de Pomar	580	460598,5	4752044	282,7125	2,22350137
Güeñes	208	491492,5	4783400,3	284,4	1,75071414
Cervera de Pisuerga	1140	375846,4	4747560,9	283,8125	2,49411808

Posada de Valdeón	953	342922,5	4778758,9	281,3	2,52487623
Punta Galea	90	498244,8	4802459,5	285,05	1,18602979

Tabla 11. Datos de temperaturas medias de las estaciones del grupo control correspondientes a la semana la semana del 15 al 21 de julio de 2019.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	MEDIA	SD
Llanes	10	358492,6	4808971,6	294,58	0,69336138
Cabrales	458	349745,7	4797030,9	293,8	1,6298006
Amieva de Panizales	370	328016,6	4792608,8	293,24	1,42627136
Colunga	30	318299,8	4817961,6	293,1	1,35277493
Riaño	1090	336259	4758143	293,78	2,38579127
Camporredondo de Alba	1575	360084,7	4750455,8	292,89	1,76790837
Aguilar de Campoo	910	395576,1	4739087,7	294,09	2,47421705
Sargentos de la Lora	1017	427615	4733093,3	294,08	3,35141761
Balmaseda	210	482956	4780886,8	294,21	3,51646129
Sopuerta	177	486319,3	4791892	294,5	2,02947037
Medina de Pomar	580	460598,5	4752044	296,18	3,43958573
Güeñes	208	491492,5	4783400,3	292,51	4,27176778

Cervera de Pisuerga	1140	375846,4	4747560,9	294,56	1,91291662
Posada de Valdeón	953	342922,5	4778758,9	291,12	1,85492587
Punta Galea	90	498244,8	4802459,5	294,58	1,21583305

Tabla 12. Datos de temperaturas medias de las estaciones del grupo control correspondientes a la semana la semana del 23 al 29 de septiembre de 2019.

ESTACIÓN	ALTITUD	ESTE	NORTE	MEDIA	SD
Llanes	10	358492,6	4808971,6	293,3125	1,06721991
Cabrales	458	349745,7	4797030,9	289,3625	1,00778222
Amieva de Panizales	370	328016,6	4792608,8	288,775	0,49244289
Colunga	30	318299,8	4817961,6	290,8	0,34880749
Riaño	1090	336259	4758143	287,35	0,59581876
Camporredondo de Alba	1575	360084,7	4750455,8	286,0625	3,03352792
Aguilar de Campoo	910	395576,1	4739087,7	285,8	0,7393691
Sargentos de la Lora	1017	427615	4733093,3	285,1125	1,17073695
Balmaseda	210	482956	4780886,8	289,7375	0,51214419
Sopuerta	177	486319,3	4791892	290,0875	0,20155644
Medina de Pomar	580	460598,5	4752044	288,05	0,5845226

Güeñes	208	491492,5	4783400,3	292,0875	1,29510296
Cervera de Pisuerga	1140	375846,4	4747560,9	287,4125	2,73141447
Posada de Valdeón	953	342922,5	4778758,9	285,8875	0,74540258
Punta Galea	90	498244,8	4802459,5	293,2125	3,04340133

Tabla 13. Diferencias en valor absoluto (en K) entre las medias de la señal de Sentinel-3 y las temperaturas medias del grupo control de cada estación del año.

Invierno	Primavera	Verano	Otoño
1.32	2.39	2.19	1.61
2.36	1.57	2.3	1.24
0.34	1.55	1.35	1.26
0.4	1.33	1.1	0.5
1.97	0.93	1.87	1.15
0.7	1.87	0.11	1.24
0.12	0.44	0.59	1.1
1.76	0.38	0.08	1.3
1.33	1.17	0.41	1.84
0.4	0.81	0.1	1.22
0.16	0.41	0.31	0.65
1.27	0.5	0.49	0.78
0.12	0.41	0.72	0.41
3.3	0.5	0.52	0.22

3.7

0.25

1.14

0.29